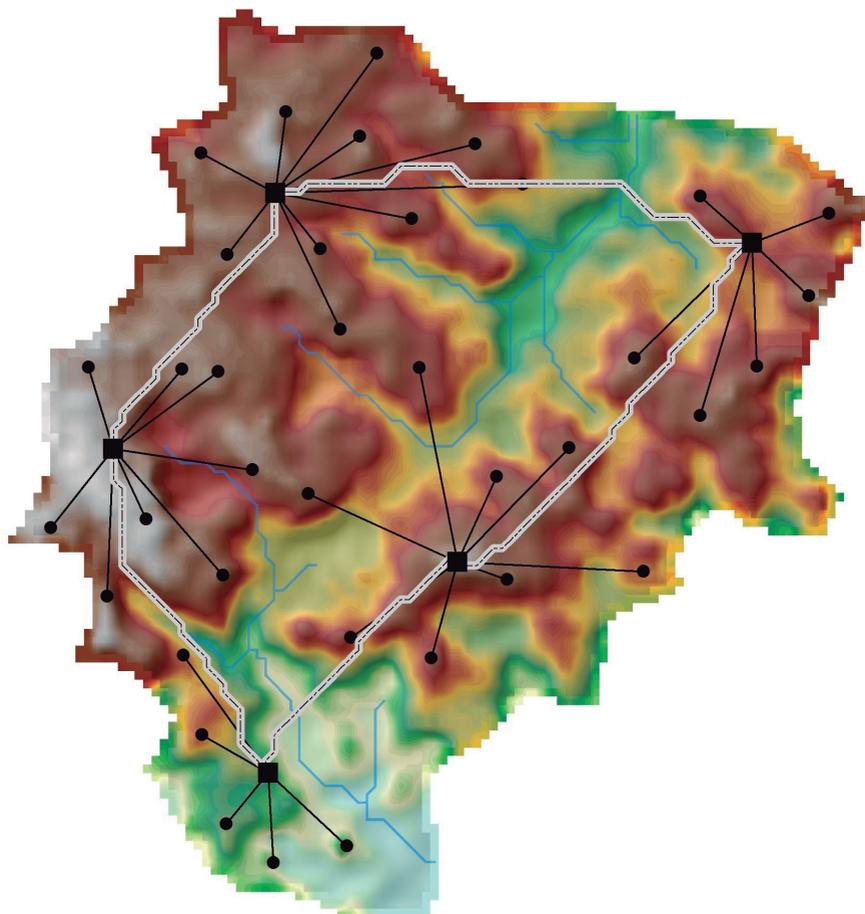


Otimização do Traçado de Trilhas para Acesso a Recursos Florestais Naturais



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Amazônia Ocidental
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 134

Otimização do Traçado de Trilhas para Acesso a Recursos Florestais Naturais

*Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro
Gustavo Eduardo Marcatti
Alisson Mello Munaretti
Kátia Emídio da Silva
Danilo Roberti Alves de Almeida
Rosiele dos Santos Vasconcelos
Elias Lourenço Vasconcelos Neto*

Embrapa Amazônia Ocidental
Manaus, AM
2017

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Amazônia Ocidental

Rodovia AM 010, Km 29, Estrada Manaus/Itacoatiara

Caixa Postal 319

Fone: (92) 3303-7800

Fax: (92) 3303-7820

<https://www.embrapa.br/amazonia-ocidental>

www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Celso Paulo de Azevedo*

Secretária: *Gleise Maria Teles de Oliveira*

Membros: *Maria Augusta Abtibol Brito de Sousa, Maria Perpétua Beleza Pereira e Ricardo Lopes*

Revisor de texto: *Maria Perpétua Beleza Pereira*

Normalização bibliográfica: *Maria Augusta Abtibol Brito de Sousa*

Diagramação: *Gleise Maria Teles de Oliveira*

Ilustração da capa: *Kátia Emídio da Silva*

1ª edição

1ª impressão (2017): 300

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação
Embrapa Amazônia Ocidental**

Otimização do traçado de trilhas para acesso a recursos florestais naturais / Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro... [et al.]. – Manaus : Embrapa Amazônia Ocidental, 2017.

99 p. : il. color. - (Documentos / Embrapa Amazônia Ocidental, ISSN 1517-3135; 134).

1. Sistema de informação geográfica (SIG). 2. Georreferenciamento. 3. Trilhas. 3. Geotecnologias. 4. Florestas naturais. I. Ribeiro, Carlos Antonio Alvares Soares. II. Marcatti, Gustavo Eduardo. III. Munaretti, Alisson Mello. IV. Silva, Kátia Emídio da. V. Almeida, Danilo Roberti Alves de. VI. Vasconcelos, Rosiele dos Santos. VII. Vasconcelos Neto, Elias Lourenço. IX. Série.

CDD 526

Autores

Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência Florestal, professor da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Gustavo Eduardo Marcatti

Engenheiro florestal, doutor em Ciência Florestal, professor da Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Sete Lagoas, MG.

Alisson Mello Munaretti

Engenheiro florestal, bolsista de Pós-Graduação da Embrapa Acre, Rio Branco, AC.

Kátia Emídio da Silva

Engenheira florestal, doutora em Ciência Florestal, pesquisadora da Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM.

Danilo Roberti Alves de Almeida

Engenheiro florestal, bolsista de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

Rosiele dos Santos Vasconcelos

Engenheira florestal, mestre em Ciências Florestais e Ambientais, supervisora do Instituto de Desenvolvimento Agropecuário e Florestal Sustentável do Estado do Amazonas (Idam), Manaus, AM.

Elias Lourenço Vasconcelos Neto

Engenheiro florestal, mestre em Ciências Florestais e Ambientais, professor da Universidade Nilton Lins, Manaus, AM.

Apresentação

A exploração e o manejo dos recursos florestais naturais, madeireiros e não madeireiros, têm sido realizados pelas comunidades extrativistas da Amazônia, com pouco aporte de conhecimentos tecnológicos. A proposta de solução tecnológica apresentada neste estudo visa contribuir para a otimização dos traçados das trilhas para acesso aos recursos, otimizando o esforço e a energia para tal fim.

Atualmente é importante levar em consideração a racionalidade no uso dos recursos florestais, a fim de garantir a sua sustentabilidade. Na extração de produtos florestais não madeireiros, a otimização do traçado das trilhas de acesso permite reduzir o tempo para chegar até os indivíduos determinados, proporcionando ainda a minimização dos impactos ambientais decorrentes dessa atividade.

A utilização dessas novas tecnologias disponíveis certamente facilita esse processo, destacando-se, nesse caso, os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). Portanto, este trabalho apresenta a metodologia detalhada para traçado de trilhas por meio de análises de redes, com as etapas implementadas em ambiente SIG.

Celso Paulo de Azevedo
Chefe-Geral Interino

Sumário

Otimização do Traçado de Trilhas para Acesso a Recursos Florestais Naturais	9
Introdução	9
Preparação do ambiente SIG para as análises	10
Obtenção dos dados necessários	11
Modelo Digital de Elevação (MDE).....	12
Características gerais.....	12
Obtenção do MDE.....	12
Carregando o MDE no ArcGIS (ArcMap)	15
Conversão do MDE para coordenadas planas UTM.....	15
Recorte do MDE para o local de interesse.....	16
Modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado ..	18
Eliminação de sumidouros espúrios.....	18
Derivação da drenagem numérica do terreno.....	20
Identificação do trajeto a jusante de um ponto.....	22

Vetorização da rede hidrográfica.....	26
Ordenamento da rede hidrográfica.....	29
Análise de redes.....	31
Conversão de células raster em malha regular de pontos altimétricos.....	34
Geração da rede a partir de uma malha regular de pontos altimétricos.....	38
Indexando informações de camadas vetoriais.....	48
Transformação de feição 2D em objeto 3D.....	52
Comprimento real de um arco.....	53
Declividade de um arco.....	56
Velocidade de Tobler.....	59
Barreiras relativas e absolutas.....	63
Ferramentas de análise de redes.....	70
Terminologia.....	71
Criação de uma rede.....	73
Otimização de rotas.....	79
Problema do Caixeiro Viajante.....	86
Entrepósitos em análise de redes.....	91
Considerações finais.....	95
Referências.....	97

Otimização do Traçado de Trilhas para Acesso a Recursos Florestais Naturais

Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro

Gustavo Eduardo Marcatti

Alisson Mello Munaretti

Kátia Emídio da Silva

Danilo Roberti Alves de Almeida

Rosiele dos Santos Vasconcelos

Elías Lourenço Vasconcelos Neto

Introdução

É notável a importância das florestas tropicais, com imensa reserva em biodiversidade, principalmente pelas riquezas naturais e o papel socioambiental que desempenham. As florestas fazem parte da vida cotidiana de pessoas diretamente ligadas a elas, seja como forma de subsistência, seja como fonte de renda. Neste contexto, cada vez mais têm-se buscado soluções tecnológicas que possibilitem o melhor aproveitamento dos recursos, com benefícios mútuos entre o homem e a floresta, visando aumentar a produtividade de forma sustentável, otimizando o tempo e o esforço laboral para a coleta e extração de determinado produto, seja ele madeireiro ou não.

A otimização do traçado de trilhas visa identificar o melhor percurso, combinando diversos fatores que determinam o grau de dificuldade de se percorrer determinada região e uma maior eficiência de acesso a árvores ou a áreas de manejo de interesse. Os estudos de variáveis regionalizadas, tais como a cobertura vegetal e o uso da terra, hidrografia e relevo (Modelos Digitais de Elevação – MDEs), caracterização e modelagem, auxiliam sobremaneira a tomada de decisões sobre o manejo. Assim, a otimização do acesso às áreas de exploração é vital não só para redução de esforço na coleta, mas

também nos impactos ambientais decorrentes do estabelecimento, do uso e da manutenção de trilhas de acesso inadequadas e até mesmo desnecessárias.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são a base para diversos processos na geração de tecnologias, realçam a importância e a versatilidade do emprego de informações de natureza intrinsecamente espacial. Aliados aos contínuos avanços na área computacional, o domínio e a adoção do SIG para modelagem e resolução desse tipo de problema são cada vez mais difundidos, proporcionando solução prática para o problema de rotas otimizadas com melhoras significativas. Isso é particularmente percebido no que se refere à melhor compreensão da complexidade do cenário e da avaliação das alternativas.

O principal objetivo deste documento é contribuir para ampliar o conhecimento e difundir a aplicação das funcionalidades básicas relacionadas às análises de redes para otimização de trilhas, visando ao acesso aos recursos naturais, com as etapas implementadas em ambiente SIG.

Preparação do ambiente SIG para as análises

Todas as etapas dos procedimentos a seguir tiveram como base o *software* ArcGIS versão 10.3 (ESRI, 2014). O primeiro passo é a organização dos dados obtidos, criados ou processados. Para isso, é imprescindível a criação de uma *Geobase*, que pode ser definida como um banco de dados espaciais que armazena informações georreferenciadas, vinculando-lhes atributos descritivos, organizados como classe de feições¹.

Para criar uma *Geobase* acesse o *ArcCatalog* e, por meio dos menus, selecione "*New > File Geodatabase*", nomeando-o por exemplo como "*utm_19s*", e depois "*New > Feature Dataset*", nome "*dados*", definindo-se, ao final do procedimento, o nome do

¹Classes de feições são coleções temáticas de feições vetoriais elementares (pontos, linhas, polígonos).

projeto e o sistema de projeção/coordenadas que será utilizado em todo o projeto (no presente caso, Sistema de Coordenadas UTM, *Datum* WGS84). Sugere-se também desabilitar o processamento em segundo plano, a fim de possibilitar a visualização do progresso de cada etapa do processamento. Para tal, no *menu* principal clique em “*Geoprocessing > Geoprocessing options*” e, na janela que se abre, desabilite a opção “Enable”.

Para os diversos processamentos desse roteiro, algumas extensões do ArcMAP deverão ser habilitadas. Na barra de *menu*, selecione “*Customize > Extensions...*”. Na janela aberta habilite as opções “*3D Analyst*”, “*Network Analyst*” e “*Spatial Analyst*” (Figura 1).

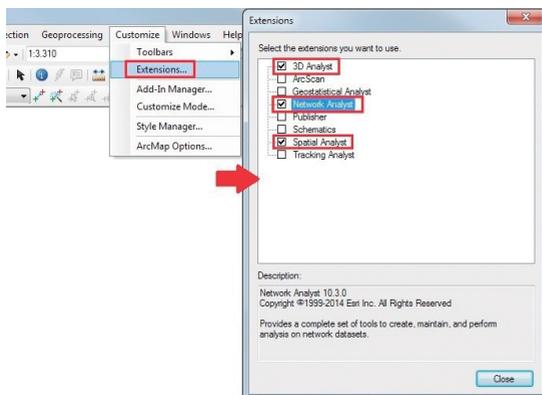


Figura 1. Destaque do processo para habilitar extensões necessárias para os processamentos.

É importante destacar que todos os arquivos gerados ao longo dessa metodologia devem conter em seu nome final um indicativo do processo que o gerou, a fim de facilitar os processamentos subsequentes, sendo estes salvos nas geobases criadas ao longo do processo.

Obtenção dos dados necessários

O conjunto de dados necessários para reprodução dessa metodologia estará disponível no link: <https://www.embrapa.br/metodologia-de-otimizacao-do-tracado-de-trilhas-para-acesso-a-recursos-florestais-naturais>

Modelo Digital de Elevação (MDE)

Características gerais

O MDE consiste em um modelo de dados espacial, que define o espaço como uma matriz de células de mesmo tamanho, dispostas em linhas e colunas, com valores de atributo para cada célula. Células com valores iguais representam características geográficas semelhantes. Uma das fontes mais utilizadas atualmente para as análises ambientais são dados de elevação da superfície terrestre, obtidos por sensoriamento remoto orbital. A disponibilização gratuita de diversas bases de dados globais é crescente; entre elas está o projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), iniciado em fevereiro de 2000 com o objetivo de produzir MDEs para toda a superfície terrestre, adotando-se a mesma metodologia do início ao fim (FIGUEIREDO et al., 2007; MIRANDA, 2015).

Os dados SRTM são disponibilizados gratuitamente a qualquer usuário pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), com células de 30 m de lado (um arco-segundo), cobrindo, dessa forma, áreas de 900 m². A contínua evolução desse segmento e a importância estratégica desses dados em inúmeras aplicações têm resultado em MDEs com resolução espacial cada vez maior, i.e., com células cada vez menores.

Obtenção do MDE

Os dados altimétricos do MDE foram extraídos da base SRTM de maior detalhamento atualmente disponível (30 m ou um arco-segundo). O banco de dados dessas cenas está disponibilizado no website do USGS*.

No site do USGS há três maneiras para se obter os dados da área de interesse: 1) Figura 2A – Inserindo as coordenadas em graus/minutos/segundos ou decimal, manualmente, ou com um clique simples em um ponto desejado do mapa; 2) Figura 2B – Fornecendo os vértices

*<http://earthexplorer.usgs.gov/>

da área de estudo, via formato *Keyhole Markup Language* (kml) ou da importação direta de shapefile (feição vetorial), em coordenadas geográficas (latitude e longitude); 3) Figura 2C – Simplesmente definindo manualmente uma área temporária em “Use Map”. Assegure-se de que todos os arquivos que compõem o shapefile estejam em uma única pasta zipada.

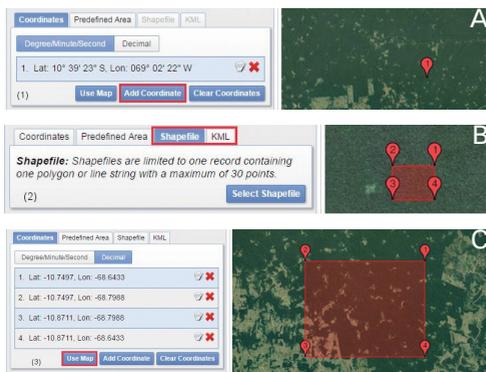


Figura 2. A) Processo de identificação da área de estudo. Inserção de coordenadas com o clique do mouse; B) Importação de um shapefile ou Kml com os limites da área de estudo; C) Definição manual de área usando o mapa como referência.

Fonte: USGS

Após a definição da área de interesse, na aba “*Data sets*” seleciona-se, dentre os vários conjuntos de dados disponíveis, os dados SRTM, acessados em “*Select Your Data Set(s)*” > “*Digital Elevation*” > *SRTM* > *SRTM 1 Arc-Second Global*” e, em seguida, clica-se em “*Results*” (Figura 3A). Após realizar a pesquisa, todas as cenas disponíveis para aquela região, tomadas em várias ocasiões, são exibidas na Figura 3B. Depois de identificada e escolhida a cena de interesse, realiza-se o *download* clicando-se na opção “*Download Options*”. Deve-se dar preferência ao formato “*GeoTIFF 1 Arc-second*” (Figura 4), que produz arquivos no formato “.tiff”, que podem ser visualizados diretamente em diversos aplicativos. Se existirem diversas imagens recobrendo a área de estudo, é mais conveniente baixá-las usando o utilitário *Bulk Download Application* (ícone logo à direita da opção *Download*), também disponível no site do USGS.



Figura 3. A) Destaque para a seleção dos dados SRTM, pesquisa no banco de dados; B) Download da cena.

Fonte: USGS

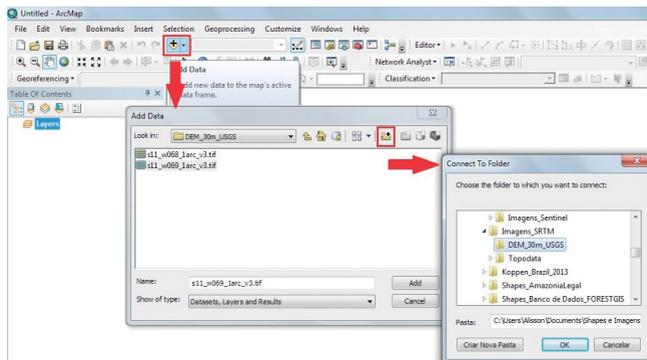


Figura 4. Sequência para adicionar a imagem SRTM e mapear o diretório para conectá-lo ao ArcMap.

Carregando o MDE no ArcGIS (ArcMap)

O primeiro passo ao se utilizar o MDE é saber qual o Sistema de Coordenadas e Datum correspondente, assegurando-se que todos os dados utilizem a mesma referência espacial. Segundo as resoluções 01/2005, de 25 de fevereiro de 2005, e 01/2015, de 25 de fevereiro de 2015, da Presidência da República, o Datum padrão adotado para o Brasil é o SIRGAS2000 ou o WGS84, que é o Datum mais próximo deste.

A partir desse ponto, todos os procedimentos serão realizados no software ArcGIS 10.3 (ESRI, 2014), com o uso de suas ferramentas e extensões necessárias à aplicação no estudo de caso proposto. Com o ArcMap já iniciado e em sua interface principal, carregue a imagem SRTM por meio da opção “Add Data” e, se for necessário, mapeie a pasta de trabalho contendo a imagem SRTM baixada, utilizando o ícone “Connect To Folder” (Figura 4). Essa operação facilitará posteriores acessos ao diretório mapeado.

Conversão do MDE para coordenadas planas UTM

As análises de redes dependem intrinsecamente do cálculo das distâncias que, por sua vez, devem necessariamente estar expressas em unidades lineares (metros, quilômetros, pés, milhas etc). O MDE baixado do USGS possui coordenadas geográficas com distâncias sendo expressas em unidades angulares (graus decimais). Assim, esses MDEs precisam ser previamente reprojitados para um sistema de coordenadas planas. Quando a região de estudo não se estender por mais de uma zona Universal Transverse Mercator (UTM) ou não tiver mais que 6° de largura (~ 666 km próximo ao Equador), pode-se adotar a projeção UTM. Dado que todas as cenas da base SRTM estão no Datum WGS84, não será necessário convertê-lo. Entretanto, há que se saber previamente em qual zona UTM se localiza a região de estudo. No presente caso, a área situa-se na zona UTM 19, Sul. Destaca-se que, para essa cena de imagem, o fuso é 19 e o meridiano central, -69°, e está localizado no Hemisfério Sul, sendo que essa definição varia com a localização da região de estudo.

Para essa etapa usa-se a caixa de ferramentas do *ArcToolbox*: “*Data Management Tools > Projections and Transformations > Raster > Project Raster*” (Figura 5). Na janela que se abre, seleciona-se a imagem SRTM de interesse em “*Input Raster*”; em seguida, a pasta de destino, definindo-se o nome para o novo arquivo gerado em “*Output Raster Dataset*”. No campo “*Output Coordinate System*”, seleciona-se o sistema de coordenadas projetadas UTM “*WGS 1984 UTM Zone 19S*” (área de interesse). Para não se alterar os valores originais de altimetria, deve-se deixar o valor NEAREST assinalado por *default* à opção “*Resampling Technique*”. Em “*Output Cell Size*”, deve-se ajustar o tamanho do pixel para 30 m em “*X*” e “*Y*” (Figura 5).

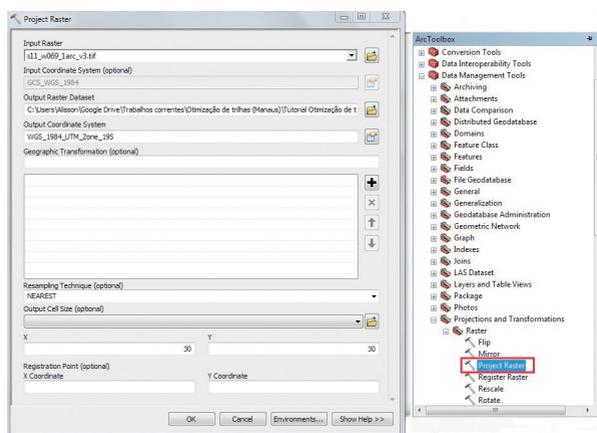


Figura 5. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Project Raster*” com as respectivas configurações definidas.

Recorte do MDE para o local de interesse

Nesta última etapa de preparação do MDE, deve-se recortar a imagem para o limite da área de estudo. Para fazer o recorte do MDE é necessário ter definidos, em formato vetorial, os limites da área de interesse, que servirá de “*máscara*” para o recorte da imagem.

Primeiramente adicione a camada vetorial da área de interesse. Essa etapa é realizada com a extensão “*Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract by Mask*” (Figura 6A). Na janela que se abre, selecione a

imagem raster de interesse em *"Input raster"* e a camada vetorial que servirá para recorte da imagem em *"Input raster or feature mask data"*, especificando-se, em seguida, o destino/nome da imagem final em *"Output raster"* (Figura 6B).

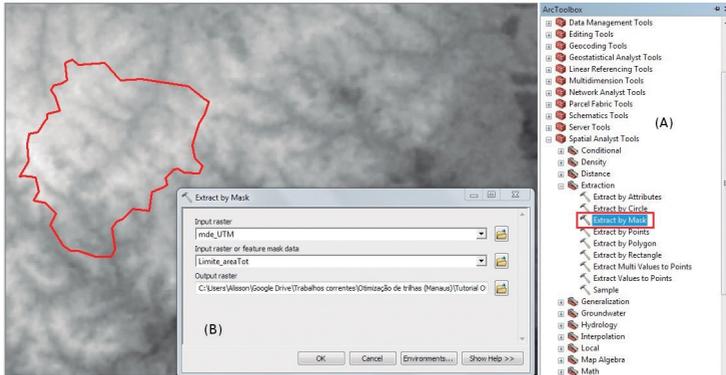


Figura 6. Recorte do MDE nos limites da área de estudo por meio da ferramenta *"Extract by Mask"*: A) Acesso à ferramenta *"Extract by Mask"*; B) Entrada (*input*) e saída (*output*) dos dados recortados.

Ao final do processo, será gerada uma nova imagem raster com as mesmas características cartográficas da imagem original, porém com informações somente dentro do limite da área de interesse (Figura 7).

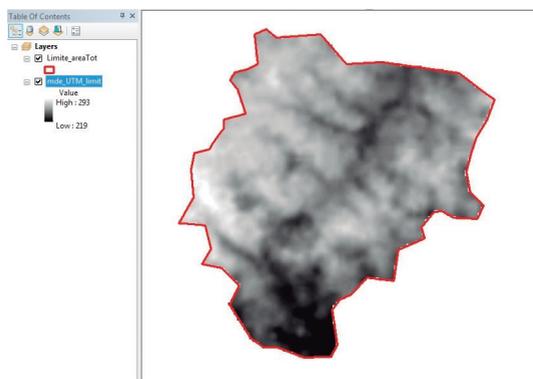


Figura 7. Imagem raster SRTM recortada nos limites da área de estudo.

Modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado

A rede hidrográfica é de extrema importância para a determinação de caminhos otimizados, por serem barreiras físicas ou fator de impedância distinta no traçado para acesso aos recursos florestais. Esse fato é particularmente relevante para a Bacia Amazônica. O MDE isoladamente possui pouca precisão em seus dados finais para análises hidrológicas, sendo necessários diversos pré-processamentos para que se obtenha uma representação fidedigna do escoamento das águas superficiais. Esses procedimentos visam à padronização na geração de MDEs ditos *Hidrograficamente Condicionados* (MDEHC) (MACHADO et al., 2010; MARTINS et al., 2011).

O MDEHC permite que as delimitações de bacias hidrográficas sejam realizadas com maior precisão, por assegurar que o escoamento originado a partir de qualquer ponto do relevo convirja para um ponto da malha hidrográfica e, a partir daí, para a respectiva foz. Essa categoria especial de MDEs caracteriza-se por apresentar coincidência considerável com a rede de drenagem real (RIBEIRO et al., 2005; MARTINS et al., 2011).

Outra opção mais acurada seria o mapeamento detalhado da rede hidrográfica com dados mais precisos; entretanto, os seus custos acabam sendo muito mais elevados quando comparado à modelagem hidrológica. Assim, a escolha final dependerá dos objetivos e das características gerais do local, como tamanho da área de estudo, maior precisão dos dados, menor custo etc.

Eliminação de sumidouros espúrios

Sumidouros espúrios, também denominados de depressões espúrias, são falhas nos valores de altimetria que prejudicam os estudos hidrográficos. Basicamente podem ser definidos por áreas ou pixels rodeados por elevações com valores de cotas superiores, funcionando como uma espécie de ralo na rede de drenagem, interferindo

diretamente no escoamento superficial. Portanto, a correção prévia do MDE é necessária.

Para essa etapa é utilizada a extensão “*Hidrology*” disponível no “*ArcToolbox*”, acessada em “*Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill*” (Figura 8). Na janela que se abre, adicione o MDE em “*Input Surface Raster*” e defina o local para salvar o arquivo de saída em “*Output surface raster*”, nomeando-o como (*mde_UTM_fill*). Ao final será gerado um novo MDE visualmente igual ao anterior, entretanto, internamente, com as depressões espúrias corrigidas.

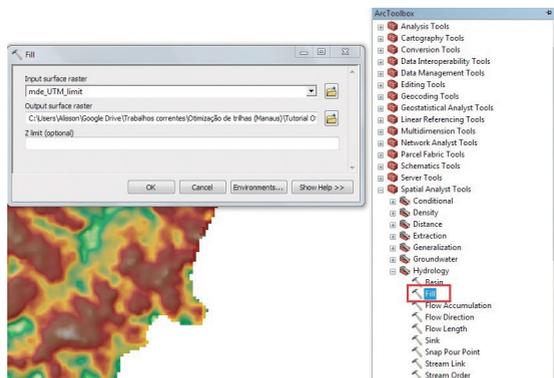


Figura 8. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Fill*” e as configurações definidas.

Há que se destacar que a visualização 3D do relevo, na Figura 8, foi obtida por meio da geração da feição “*mde_UTM_sombra*”, gerada por uma ação opcional. Essa operação pode ser realizada utilizando-se a ferramenta *Hillshade*, acessada em “*Spatial Analyst Tools > Surface > Hillshade*”. Para tal, carrega-se o *MDE_fill*, definindo o local para salvar o arquivo que será adicionado ao projeto. Posteriormente, na janela de conteúdos, certifique-se de que a camada sombra gerada esteja acima do “*MDE_fill*”, na tabela de conteúdos. Em seguida, com o botão direito sobre a camada da sombra, vá até “*Properties...*”, e então, na janela que se abre, selecione a aba “*Display*” e defina: em “*Resample during display using*” e escolha “*Bilinear Interpolation (for contínuos*

data)", esse mesmo processo deve ser feito no arquivo do MDE; em "*Transparency*" atribua o valor da porcentagem de transparência, que nesse caso foi usado 75%.

Derivação da drenagem numérica do terreno

Os passos seguintes têm por objetivo derivar o traçado da rede hidrográfica com base no MDE. Primeiro, deve-se acessar a ferramenta "*Flow direction*", objetivando calcular a direção de escoamento para cada pixel, com base nas cotas do terreno. Para essa etapa é importante que as depressões espúrias já estejam corrigidas, caso contrário ocorrerá erro na drenagem numérica. Todos os valores de escoamento em direção a outro pixel assumem sempre valores referentes à potência de 2 ($2^0 = 1$, $2^1 = 2$, $2^2 = 4$, $2^3 = 8$, $2^4 = 16$, $2^5 = 32$, $2^6 = 64$, $2^7 = 128$). Esse é o padrão de codificação implementado no ArgGIS (Figura 9).

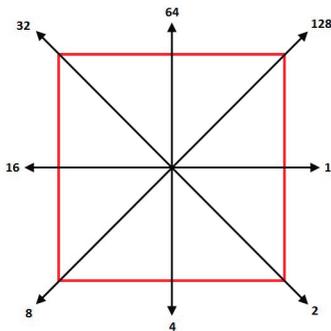


Figura 9. Direção de escoamento para pixels adjacentes e seus respectivos valores para cada direção.

Para acessar essa ferramenta, no *ArcToolbox*, acesse "*Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction*". Na janela que se abre, adicione em "*Input surface raster*" a imagem gerada no processo anterior pela ferramenta "*Fill*" e, em seguida, especifique o arquivo de saída em "*Output flow direction raster*" com a opção "*Force all edges cells to flow outward*"³ marcada (Figura 10).

³A opção marcada é especialmente importante para os casos em que o perímetro da área de estudo se estender por uma margem de pelo menos 1 célula de largura, ao redor do divisor de águas.

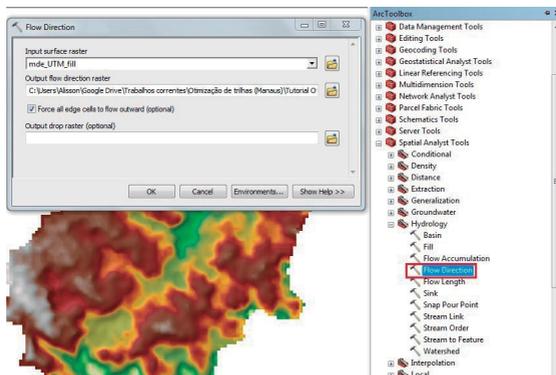


Figura 10. Acesso e destaque para a ferramenta “Flow Direction” e as configurações definidas.

O resultado é uma nova imagem, evidenciando a direção de fluxo de cada pixel, como mostrado na tabela de atributos (Figura 11). Como dica de validação desse resultado, ao se observar na tabela valores que não sejam potência de 2, significa que há presença de sumidouros ou depressões espúrias. Caso isso venha a ocorrer, deve-se aplicar novamente o comando “Fill” e recalcular as direções de escoamento. É importante ressaltar que quanto mais marcante for o relevo, ou seja, maior a diferença entre as cotas dos pixels, mais visível será o fluxo de direção. No presente estudo de caso, a área de estudo não apresenta direção do fluxo constante.

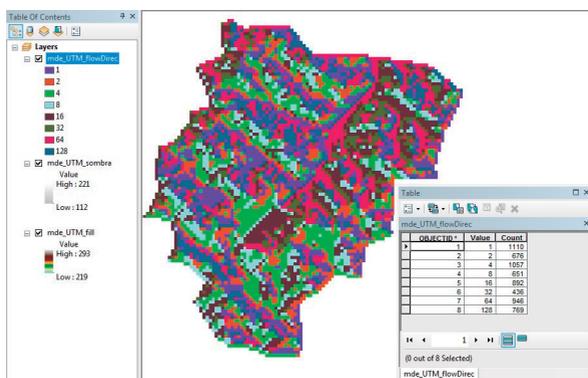


Figura 11. Resultado do processo de identificação da direção de escoamento (“Flow Direction”) de cada pixel, sendo Value = valor da direção de fluxo; Count = quantidade de pixels em uma dada direção.

Definidas as direções de fluxo, pode-se então calcular a área existente acima (área a montante) de uma célula ou pixel. As células com maiores valores estão geralmente associadas a fundos de vales, sendo, portanto, indicadoras da hidrografia. Para derivar o grid de fluxo acumulado, usa-se a ferramenta *"Flow Accumulation"*, disponível em *"Spatial Analyst Tools > Hydrology"*. Em seguida, insira em *"Input flow direction raster"* a imagem processada pela função *"Flow Direction"* e em *"Output accumulation raster"* indique o diretório para salvar o arquivo de saída. Deixe vazio o campo em *"Input weight raster (optional)"* e selecione *"Float"* (valor acumulado) em *"Output data type (optional)"* (Figura 12). Destaca-se que o resultado desse processamento gera uma imagem que permite inferir a localização da hidrografia, com células de maior valor de escoamento representadas por tons claros de cinza.

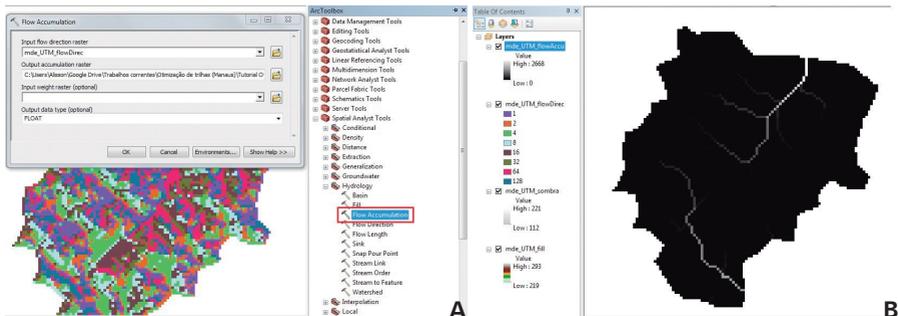


Figura 12. A) Caminho de acesso e destaque para a ferramenta *"Flow Accumulation"* e as configurações definidas; B) Resultado do processo de cálculo do fluxo acumulado, destacando-se as redes hidrográficas principais em tons mais claros.

Identificação do trajeto a jusante de um ponto

Para um traçado mais próximo do real, com a modelagem da hidrografia a partir do MDE, é importante incluir a localização geográfica de cada nascente de corpos d'água dentro da área de estudo, para assim identificar o trajeto a jusante desses pontos. Essas localizações podem ser obtidas das seguintes formas: (a) por meio de coletas em campo das coordenadas de cada nascente, com uso de receptor GPS; (b) virtualmente por meio da imagem de direção de acumulação gerada

na etapa anterior; (c) a partir de imagens de satélite mais detalhadas; ou, ainda, (d) seguir com o ordenamento da hidrografia de acordo com metodologia definida em Figueiredo et al. (2007). Essa etapa serve para refinar as análises quando se tem em mãos um conjunto de dados mais completo.

Neste estudo de caso, será adicionado ao ArcMap a feição vetorial tipo ponto com a localização das nascentes (Figura 13).

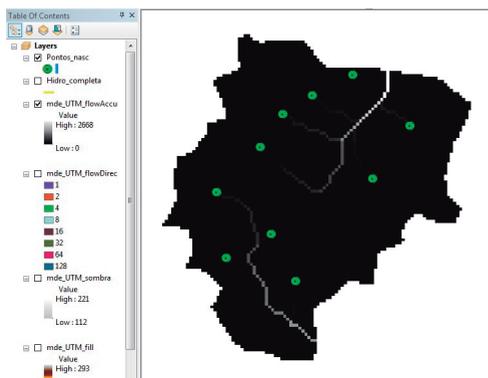


Figura 13. Feição vetorial de pontos das nascentes adicionadas ao projeto (pontos verdes).

Para o cálculo do trajeto a jusante, a partir do MDE e das nascentes, será utilizada a ferramenta *"Cost Path"*. Essa ferramenta calcula o caminho de menor impedância a partir de origens e um destino, com base em um custo associado ao percorrer uma superfície. Para isso, acesse, no *ArcToolbox*, *"Spatial Analyst Tools > Distance > Cost Path"*. Na janela que se abre, adicione a feição vetorial de pontos das nascentes em *"Input raster or feature destination data"*; deixe *"OBJECTID"* como padrão no campo *"Destination field (optional)"*. Em *"Input cost distance raster"*, adicione a imagem corrigida de depressões espúrias, gerada no processo *"Fill"*; em *"Input cost backlink raster"*, adicione a imagem gerada pelo processo *"Flow direction"*. Defina o nome *"hidro_nasc"* e local para salvar o arquivo de saída em *"Output raster"*, e, em *"Path type"* selecione *"EACH_CELL"*, ou seja, caminho passando por cada célula raster (Figura 14). Os valores de elevação representam o grau de dificuldade (impedância) de se mover de uma

célula para outra; assim, a direção de movimentação entre duas células vizinhas será ditada pela inclinação do segmento mais íngreme conectando o centro de duas células adjacentes. Já o *grid* “*Cost Backlink raster*” fornece, em última análise, a direção de uma célula qualquer para se retornar à origem. Como a(s) foz(es) é(são) tratada(s) como origem(ns) – e as nascentes, como destinos –, as direções de fluxo representam adequadamente as conexões (*links*) no sentido inverso (*back*).

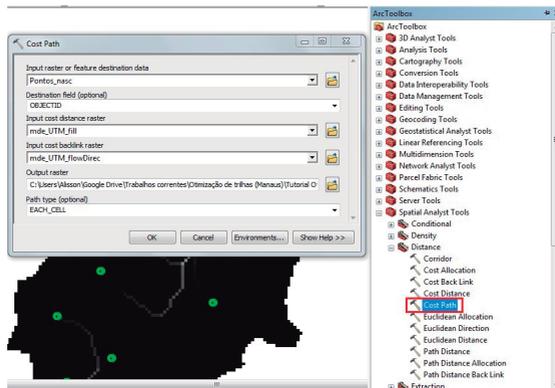


Figura 14. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Cost Path*” e as configurações definidas.

Antes de finalizar esse processo, é importante configurar o ambiente para análises, assegurando que o processamento ocorra da maneira correta. Para isso clique na opção “*Environments...*”, ainda na Figura 14, e acesse o item “*Processing Extent*” (Figura 15A) selecionando a imagem gerada no processo “*Fill*” como extensão do processamento e também para a opção “*Snap raster*” (Figura 15B). Na Figura 15C, selecione o item “*Raster Analysis*”: em “*Cell size*” e “*Mask*”, selecione a mesma imagem gerada pelo processo “*Fill*”. Essa configuração permite ao software fazer o processamento somente para extensão do MDE da área de estudo, impondo-se o tamanho da célula de 30 m.

Ao final do procedimento, é gerada a segmentação da hidrografia a partir dos pontos de nascentes, direção de fluxos e fluxo acumulado, com base no MDEHC gerado com os dados SRTM (Figura 16).

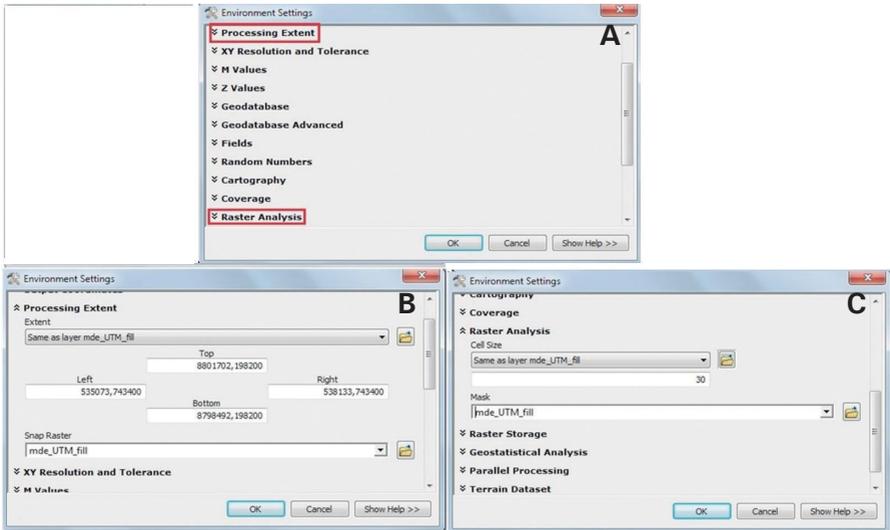


Figura 15. Configuração do ambiente para o processamento, com opções “Processing Extent” (A) e (B) e “Raster Analysis” (C).

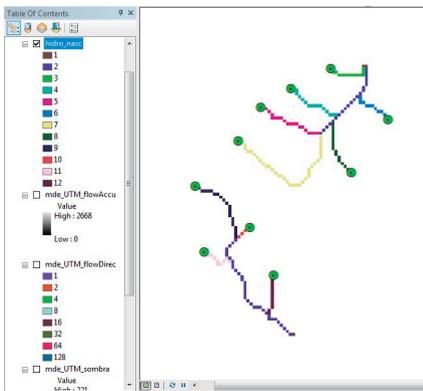


Figura 16. Resultado da segmentação da hidrografia a jusante de um ponto.

As células de cada segmento da hidrografia recebem o valor assinalado como identificador da respectiva nascente; quando dois trajetos convergem, as células do trajeto a jusante do ponto de convergência até a respectiva foz recebem um novo valor, diferente de todos os identificadores das demais células. Se um trajeto convergir para um trajeto já existente, as células do trajeto a jusante da confluência manterão os valores já assinalados.

Vetorização da rede hidrográfica

Nesta etapa, a rede hidrográfica gerada no processo anterior será apropriadamente segmentada e convertida para feição vetorial tipo linha, possibilitando sua posterior utilização nas análises de redes.

Para conversão da segmentação da hidrografia para o formato vetorial tipo linha, deve-se acessar a ferramenta *“Stream to Feature”* disponível em *“Spatial Analyst Tools > Hidrology > Stream to Feature”* (Figura 17). Na janela que se abre adicione em *“Input stream raster”* a hidrografia gerada no último processo a partir das nascentes e, em *“Input flow direction raster”*, o raster gerado no processo de direção de fluxo. É extremamente importante desabilitar a opção *“Simplify polylines (optional)”*, ou seja, não se deseja simplificar linhas, pois o objetivo é que seja seguido exatamente o trajeto célula a célula.

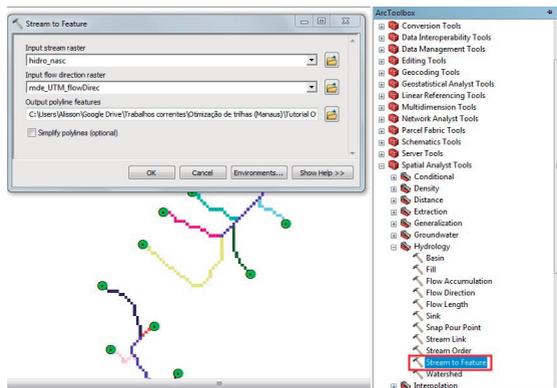


Figura 17. Acesso e destaque para a ferramenta *“Stream to Feature”* e as configurações definidas.

Os segmentos vetoriais resultantes dessa operação são armazenados em uma classe de feições (*Output polyline features*) e estão todos automaticamente orientados no sentido correto do escoamento das águas superficiais, i.e., na direção da respectiva foz (Figura 18).

Na Figura 18, selecione uma nascente e amplie a imagem (zoom +) de modo a se visualizar os pixels, a fim de se perceber que o

segmento vetorial cruza as nascentes até à borda do pixel, passando da localização da nascente (Figura 19). Isso é um problema há muito identificado no uso do comando “*Stream to Feature*”. A ferramenta “*Raster to Polyline*” evita esse problema; entretanto, tem o inconveniente de não assinalar corretamente a respectiva direção de escoamento de cada arco. Vale salientar que cada pixel cobre uma área de 900 m²; conseqüentemente, a localização de uma nascente coletada com receptor GPS em qualquer ponto dentro de um pixel não terá detalhes suficientes para distinção, sendo que somente o pixel inteiro é considerado nas análises. Assim, as nascentes foram alocadas sistematicamente no centro de cada pixel.

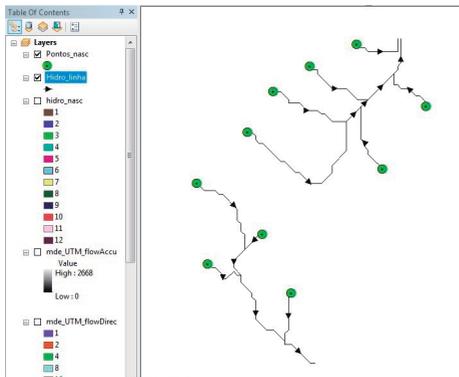


Figura 18. Resultado da conversão da hidrografia rasterizada em feições vetoriais do tipo linha, com as respectivas direções do escoamento.



Figura 19. Localização da nascente no centro do pixel, evidenciando o erro do segmento da hidrografia, que ultrapassa o ponto da nascente, necessitando de correções adicionais.

Para se eliminar a porção do segmento que se estende além da respectiva nascente, utiliza-se a ferramenta “*Snap*” para fins de ajuste e aderência, disponível em “*Editing Tools > Snap*” no *ArcToolbox* (Figura 20). Em “*Input Features*” insira a hidrografia vetorial gerada no último processo e, em “*Snap Environment*”, carregue a feição tipo “pontos” contendo a localização das nascentes; clique em “*Type*” e selecione a opção “*END*”. No campo “*Distance*”, digite o valor 22 (Figura 20). Automaticamente essa ferramenta ajusta a hidrografia finalizando nos pontos das nascentes; como o segmento poderá se estender na diagonal, o valor correto para o parâmetro “*Distance*” será igual à metade do tamanho da célula multiplicado pela raiz quadrada de 2. O valor 22 equivale à metade da diagonal do pixel, arredondado para o maior inteiro, calculado por trigonometria a partir da dimensão do seu lado (30 m), i.e., $15\sqrt{2}$.

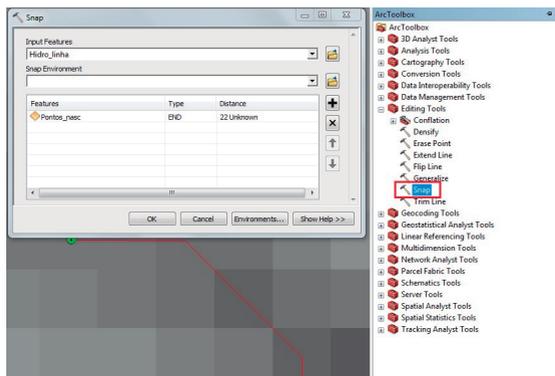


Figura 20. Caminho de acesso à ferramenta “*Snap*” e suas configurações definidas.

O próximo passo é realizar a segmentação da hidrografia propriamente dita. Segmentos são seções de uma rede hidrográfica conectando: (a) uma nascente a uma confluência; (b) duas confluências consecutivas; ou (c) uma confluência à foz. Na representação matricial (*raster*), cada segmento é assinalado com um identificador único, sendo que todas as células de um dado segmento recebem esse mesmo valor. Para efetuar a identificação dos segmentos da hidrografia, é utilizada a ferramenta “*Stream Link*”, disponível em “*Spatial Analyst Tools*

> *Hidrology* > *Stream Link*" (Figura 21). Na janela que se abre, em "*Input stream raster*", adicione a hidrografia no formato raster, gerada a partir do traçado a jusante de um ponto ("*hidro_nasc*" e, em "*Input flow direction raster*", adicione o raster gerado no processo de direção do fluxo. Por último, selecione o diretório para salvar o novo arquivo gerado digitando o nome "*hidro_seg*".

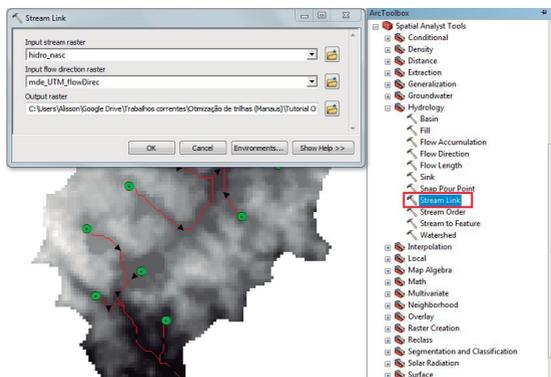


Figura 21. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta "*Stream Link*" e as configurações definidas.

Ordenamento da rede hidrográfica

Ordenamento da hidrografia é um método para atribuir códigos numéricos aos segmentos de uma rede (ESRI, 2016). Para realizar essa ação, o ArcMap disponibiliza a ferramenta "*Stream Order*", em "*Spatial Analyst Tools* > *Hidrology* > *Stream Order*" (Figura 22). Na janela que se abre, em "*Input stream raster*", insira o mesmo raster da hidrografia gerada no processo da jusante de um ponto (*hidro_nasc*) e também o raster de direção do fluxo em "*Input flow direction raster*"; em "*Output raster*", insira o nome "*hidro_shreve*" e o diretório de destino. Em "*Method of stream ordring (optional)*", escolha "*SHREVE*".

Para o ordenamento da hidrografia, o ArcMap disponibiliza duas opções em "*Method of stream ordering (optional)*" (Figura 22): Strahler (1952) e Shreve (1966). O método de Strahler designa, como de primeira ordem, todos os segmentos da hidrografia sem

afluentes. i.e., aqueles que têm por origem uma nascente (ordem 1). A ordem do fluxo (segmento) aumenta somente quando fluxos da mesma ordem se interceptam (Figura 23). Assim, a interseção de dois segmentos de primeira ordem resultará em um segmento de segunda ordem imediatamente a jusante; a interseção de dois segmentos de segunda ordem dará origem a um de terceira ordem, e assim por diante (STRAHLER, 1952; ESRI, 2016).

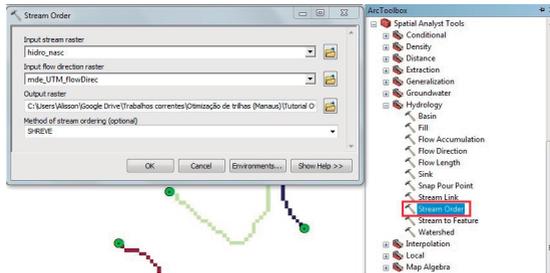


Figura 22. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “Stream Order” e as configurações definidas.

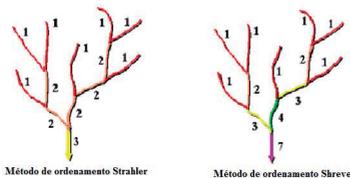


Figura 23. Ordens dos segmentos de acordo com os métodos de Strahler e Shreve.

Fonte: Adaptado de ESRI (2016).

Algumas características acerca dos rios podem ser diretamente inferidas a partir de sua ordem. Por exemplo, como os rios de cabeceira não recebem aporte de nenhum tributário, eles são muito mais afetados pelo escoamento superficial na respectiva área de drenagem. Qualquer contaminação dessas áreas poderá atingir a nascente, propagando-se rio abaixo. Por isso, as bacias de cabeceira são mais suscetíveis à contaminação difusa. Zonas de proteção ripárias mais largas ao longo dos rios de primeira ordem produzem proporcionalmente mais benefícios ambientais do que aquelas estabelecidas em outras áreas

da bacia hidrográfica (ESRI, 2016). Não por acaso, o Código Florestal Brasileiro anterior (Lei nº 4.771) considerava esses espaços como Áreas de Preservação Permanente (RIBEIRO et al., 2005).

No método de Shreve, a ordem de um dado segmento reflete o número de tributários de primeira ordem e, conseqüentemente, o número de nascentes existentes a montante. Assim, a ordem de qualquer segmento é calculada somando-se a ordem dos dois segmentos que lhe dão origem (Figura 25) (SHREVE, 1966; ESRI, 2016). Nesse documento foi utilizado o método de Shreve, tendo como resultado a identificação da ordem de cada segmento (Figura 24).

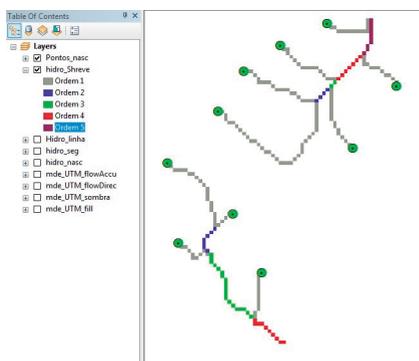


Figura 24. Resultado do ordenamento da hidrografia pelo método de Shreve.

Análise de redes

Os próximos passos norteiam a construção de uma rede para simular o deslocamento ao longo do terreno, tendo como custo desse deslocamento a impedância, a declividade e a presença de rede hidrográfica. Por se tratar de vários processos no qual se deve utilizar a feição correta para o sucesso do procedimento, será sugerida uma nomenclatura a ser adotada para cada resultado.

O ambiente raster viabiliza uma série de recursos para se identificar o melhor percurso conectando uma origem a um destino. Entenda-se “melhor” como: menor custo, menor distância, menor tempo,

mais seguro, de maior beleza cênica etc. Essa situação caracteriza o problema de se projetar um novo trecho de uma malha viária, de uma maneira ótima, possibilitando considerar diversos custos (de desapropriação, de corte e aterro, de pavimentação, de construção de pontes, túneis, viadutos), bem como barreiras absolutas (regiões urbanas, áreas de proteção ambiental, terras indígenas) e relativas (tipo de solo, declividade, cobertura vegetal e uso da terra) ao longo da análise. Um exemplo clássico é o estabelecimento ótimo de uma rede de estradas para exploração florestal de um novo projeto de reflorestamento. Há, entretanto, uma série de outros problemas envolvendo deslocamentos, que não podem ser modelados em uma representação raster.

O universo das análises de redes em ambiente vetorial complementa e amplia consideravelmente os recursos existentes no mundo raster. Citam-se as seguintes classes de problemas que se beneficiam sobremaneira dessa estrutura particular de representação espacial:

- Instalação mais próxima (onde está o posto de gasolina mais próximo?);
- Localização-alocação (qual é o melhor local para se instalar um novo supermercado?);
- Menor caminho (qual o trajeto mais rápido para se chegar ao aeroporto, na hora do almoço?);
- Abrangência (que regiões estão a até 20 minutos de cada uma das escolas da cidade?);
- Roteamento (qual a melhor sequência para o carteiro entregar todas as correspondências?);
- Matriz de custos (determinar todas as combinações para se conectar n origens a m destinos).

Todas as análises de redes requerem, a priori, a existência de uma rede de arcos conectados, com as respectivas impedâncias (atritos, custos)

de se percorrê-los em um sentido ou outro. O problema de coleta de castanhas envolve, essencialmente, identificar a sequência ótima das castanheiras a serem visitadas e, considerando-se as peculiaridades do terreno (relevo, vegetação, hidrografia), estabelecer o melhor traçado das trilhas conectando esses pontos. A modelagem matricial permitiria identificar o menor caminho conectando, célula a célula, duas castanheiras, mas não o menor caminho conectando todas elas e, mais limitante ainda, a ordem em que deveriam ser visitadas. Já a modelagem vetorial – análise de redes – permite identificar a sequência ótima e o menor percurso para se visitar todas as castanheiras; porém, há que se fornecer, de antemão, os trajetos conectando as diversas castanheiras. Para se resolver esse impasse, desenvolveu-se aqui uma abordagem híbrida, que utiliza uma estrutura vetorial para estabelecer a conexão entre células vizinhas, possibilitando identificar a sequência ideal e o melhor caminho para se coletar os frutos das diversas castanheiras, contemplando todas as rotas possíveis.

Para minimizar as eventuais distorções que inevitavelmente surgirão nos inúmeros processos de rasterização de dados vetoriais e vetorização de dados raster, deve-se garantir a manutenção da resolução geométrica para ambos os modelos de dados, i.e., raster e vetorial. Isso significa que a distância mínima entre dois vértices consecutivos de um arco deverá ser igual ao tamanho da célula do raster, o que resultará em contornos vetoriais serrilhados, ao invés de curvas suaves, de estética realmente bem menos agradável aos olhos. Longe de representar qualquer limitação mais séria, essa correspondência biunívoca entre raster e vetor é essencial para assegurar a unicidade dos resultados, independentemente do modelo de dados adotado para realizar as tarefas. Assim, a rasterização de uma hidrografia vetorial “hv1”, obtida a partir da vetorização de uma rede hidrográfica raster “hr1” (obtida, por exemplo, a partir da identificação automática do trajeto a jusante das nascentes), deverá resultar em uma nova hidrografia raster “hr2” idêntica a “hr1”. Analogamente, a vetorização da hidrografia raster “hr2” deverá resultar em uma nova hidrografia vetorial “hv2”, necessariamente idêntica a “hv1”.

Conversão de células raster em malha regular de pontos altimétricos

Para organização dos dados a serem utilizados e produzidos ao longo deste projeto, clique em *Catalog* e, na janela que se abre, crie um nova *Geobase* com o nome de “*Trilhas*”. Dentro dela, crie um novo conjunto de classes de feições (“*Feature Dataset*”), nomeando-o “*Trilhas_WGS84_UTM*” (Figura 25).

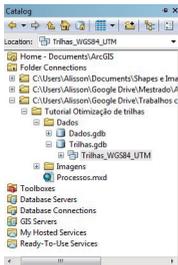


Figura 25. Criação da *Geobase* e classes de feições para armazenamento de dados.

Importe para a *Geobase* criada, o MDE gerado pelo processo “*Fill*” e a hidrografia ordenada pelo método de Shreve. Para isso, posicione o cursor sobre o nome da *Geobase* e clique com botão direito do mouse. Clique na opção *Import* e, na lista seguinte, clique na opção “*Raster Datasets*” (Figura 26).

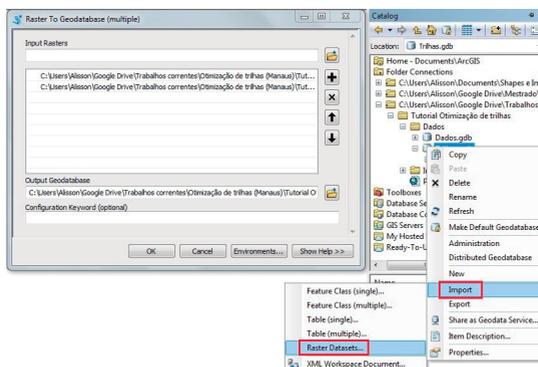


Figura 26. Importação de diversos rasters para o *Geobase*.

Nessa etapa, o MDE gerado pelo processo "Fill", chamado de "mde_UTM_fill", servirá de base para se gerar uma malha regular de pontos altimétricos. Para isso, utilize a ferramenta "Raster to Multipoint", disponível em "3D Analyst Tools > Conversion > From Raster > Raster to Multipoint" (Figura 27). Na janela que se abre, em "Input Raster", adicione o "mde_UTM_fill" e então selecione o local para salvar no *feature data set* (Trilhas_WGS84_UTM) e o nome como "pontos_3D_multi". Mantenha as demais configurações como padrão.

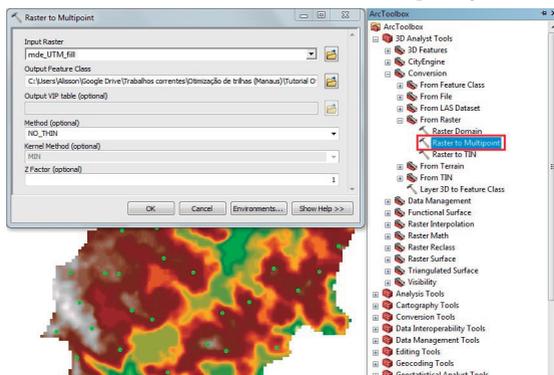


Figura 27. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta "Raster to Multipoint" e as configurações definidas.

Como resultado, será gerada uma camada vetorial do tipo "ponto", onde cada um está situado exatamente no centro da respectiva célula, contendo o valor da cota (altitude) na sua tabela de atributos (Figura 28).



Figura 28. Resultado da criação da camada vetorial tipo "ponto" a partir de um raster contendo os valores altimétricos.

Entretanto, ao observarmos a tabela de atributos da feição “*pontos_3D_multi*”, constatamos que essa camada vetorial tem todos os pontos representados por uma única feição (feição multipontos). Assim, torna-se necessário fazer a individualização de cada ponto, para que possamos visualizar as informações altimétricas de cada célula. Para isso, acesse “*Data Management Tools > Features > Multipart to Singlepart*” (Figura 29). Na janela que se abre, na lista “*Input Features*” selecione “*pontos_3D_multi*” e salve o resultado com o nome “*pontos_3D_single*”, no conjunto de classes de feições “*Trilhas_WGS84_UTM*”.

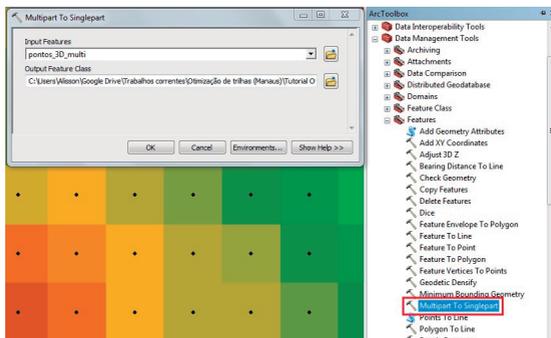


Figura 29. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Multipart To Singlepart*” e as configurações definidas.

Visualmente, o resultado desse processo não terá qualquer diferença; entretanto, ao acessarmos a tabela de atributos dessa nova classe de feições, verifica-se que cada ponto estará agora individualizado (Figura 30).

O próximo passo é obter os valores X, Y e Z (coordenadas e elevação) de cada ponto, armazenando-os na sua tabela de atributos. Essas informações estão guardadas internamente na feição. Para isso será usada a ferramenta “*Add Geometry Attributes*”, acessada em “*Data Management Tools > Features > Add Geometry Attributes*” (Figura 31). Adicione na janela aberta a camada “*pontos_3D_single*” em “*Input Features*” e logo abaixo selecione a opção “*POINT_X_Y_Z_M*”. As demais opções não precisam ser preenchidas.

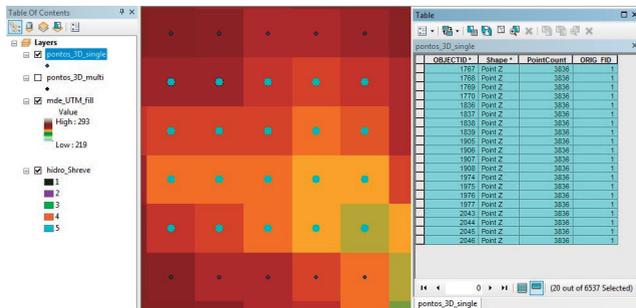


Figura 30. Resultado da individualização dos elementos de uma feição multiponto, mostrando a respectiva tabela de atributos.

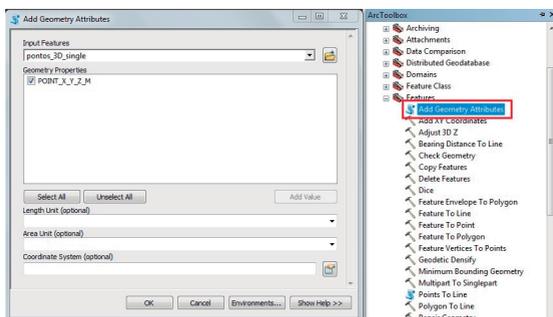


Figura 31. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “Add Geometry Attributes” e as configurações definidas.

Como resultado, na tabela de atributos da camada “pontor_3D_single”, serão exibidas as coordenadas (X, Y, Z) de cada ponto individualizado (Figura 32).

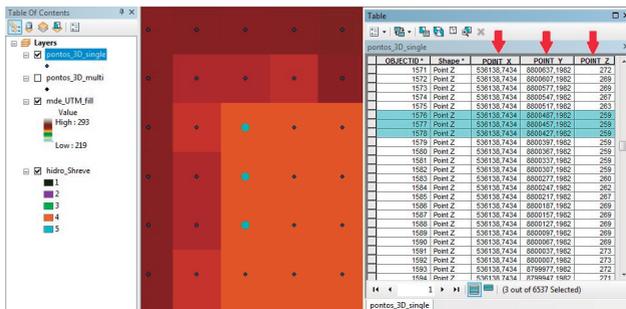


Figura 32. Tabela de atributos com destaque para as coordenadas X, Y e Z adicionadas à feição.

Ao visualizarmos a tabela de atributos, há diversos campos contendo informações irrelevantes para as etapas subseqüentes. A exclusão dessas colunas não prejudicará as análises e deixará a tabela mais “enxuta”. Para isso acesse “*Data Management Tools > Fields > Delete Field*” e selecione as colunas a serem excluídas, deixando somente os campos (colunas), *OBJECTID*, *Shape*, *POINT_X*, *POINT_Y* e *POINT_Z*. Deve-se tomar cuidado na execução desse processo, pois se for deletado qualquer um dos campos citados erroneamente não há a possibilidade de se desfazer essa ação.

Geração da rede a partir de uma malha regular de pontos altimétricos

No ambiente raster, o deslocamento só é possível entre células adjacentes conforme ilustrado na Figura 33. Para replicar essa propriedade na estrutura vetorial, cada ponto deverá ser conectado por um segmento de reta a cada um dos seus oito pontos vizinhos⁴. Para gerar todas as linhas/grades ligando os pontos adjacentes, mantendo-se a informação geográfica de cada ponto, são necessários vários processos manuseando a tabela de atributos das feições, tais como a criação de colunas e inclusão de novos dados. O primeiro passo será identificar os oitos vizinhos mais próximos de cada ponto (Figura 33), permitindo traçar a ligação do ponto aos seus vizinhos.

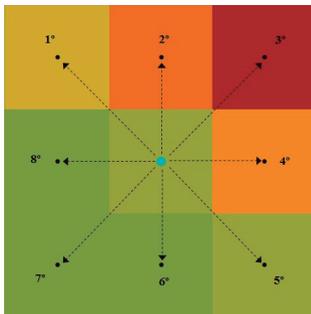


Figura 33. Direção dos oito vizinhos mais próximos de um ponto selecionado

⁴Pontos situados nos limites da área de estudo terão um número menor de vizinhos.

Para essa etapa será utilizada a ferramenta *“Generate Near Table”*, disponível em *“Analysis Tools > Proximity > Generate Near Table”*. Na janela que se abre, as seguintes informações devem ser preenchidas (Figura 34): em *“Input Features”* adicionar a camada *“pontos_3D_single”*; em *“Near Features”*, novamente a camada *“pontos_3D_single”*, ou seja, irá procurar os pontos mais próximos do próprio conjunto de pontos; em *“Output Table”* indicar o local para salvar, dando-lhe o nome *“tabela_OD”* (OD = origem-destino); em *“Search Radius”* digitar o valor 45, que significa o valor em metros do raio máximo para se procurar um ponto vizinho. A distância máxima entre duas células adjacentes estará associada às células conectadas diagonalmente. Considerando-se o valor de 30 m para o tamanho de uma célula deste estudo de caso específico, a diagonal entre dois pontos é igual a $42,43\text{ m}$, i.e., $30\sqrt{2}$, arredondando-se esse valor para 45. Marca-se a opção *“Location (optional)”*, desmarcando *“Angle (optional)”* e *“Find only closest feature (optional)”*, ou seja, armazenar o identificador e a localização (coordenadas X,Y) de todos os vizinhos mais próximos encontrados dentro do raio de busca e não somente as informações do vizinho mais próximo; em *“Maximum number of closest matches (optional)”* digitar o valor 8, ou seja, encontrar os oito primeiros pontos; em *“Method (optional)”* mantenha o valor padrão (Planar).

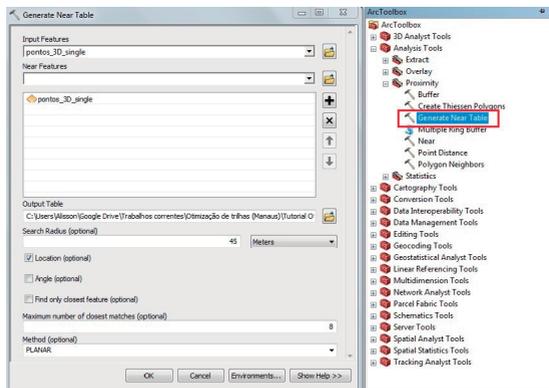


Figura 34. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta *“Generate Near Table”* e as configurações definidas.

O resultado desse procedimento é uma tabela indicando os oito vizinhos mais próximos de cada ponto, com suas respectivas identificações, distâncias, ordenamentos de proximidade e coordenadas (Figura 35). Cabe destacar que, apesar de se utilizar a mesma camada de pontos como origem e destino, cada ponto é desconsiderado no processo de se identificar seus vizinhos mais próximos.

OBJECTID	IN_FID	NEAR_FID	NEAR_DIST	NEAR_RANK	FROM_X	FROM_Y	NEAR_X	NEAR_Y
12061	1550	1481	30	1	536138.7434	8801207.1982	536138.7434	8801207.1982
12064	1550	1549	30	1	536138.7434	8801207.1982	536138.7434	8801207.1982
12065	1550	1551	30	1	536138.7434	8801207.1982	536138.7434	8801207.1982
12068	1550	1619	30	1	536138.7434	8801207.1982	536138.7434	8801207.1982
12067	1550	1480	42.426407	2	536138.7434	8801207.1982	536108.7434	8801207.1982
12069	1550	1482	42.426407	2	536138.7434	8801207.1982	536108.7434	8801207.1982
12069	1550	1618	42.426407	2	536138.7434	8801207.1982	536168.7434	8801207.1982
12070	1550	1620	42.426407	2	536138.7434	8801207.1982	536168.7434	8801207.1982
12071	1551	1482	30	1	536138.7434	8801237.1982	536108.7434	8801237.1982
12072	1551	1550	30	1	536138.7434	8801237.1982	536138.7434	8801207.1982
12073	1551	1552	30	1	536138.7434	8801237.1982	536138.7434	8801207.1982
12074	1551	1620	30	1	536138.7434	8801237.1982	536108.7434	8801237.1982
12075	1551	1481	42.426407	2	536138.7434	8801237.1982	536108.7434	8801207.1982
12076	1551	1483	42.426407	2	536138.7434	8801237.1982	536108.7434	8801207.1982
12077	1551	1619	42.426407	2	536138.7434	8801237.1982	536168.7434	8801207.1982
12078	1551	1621	42.426407	2	536138.7434	8801237.1982	536168.7434	8801207.1982
12079	1552	1483	30	1	536138.7434	8801207.1982	536108.7434	8801207.1982
12080	1552	1551	30	1	536138.7434	8801207.1982	536138.7434	8801237.1982
12081	1552	1553	30	1	536138.7434	8801207.1982	536138.7434	8801177.1982
12082	1552	1621	30	1	536138.7434	8801207.1982	536168.7434	8801207.1982
12083	1552	1482	42.426407	2	536138.7434	8801207.1982	536108.7434	8801237.1982
12084	1552	1484	42.426407	2	536138.7434	8801207.1982	536108.7434	8801177.1982
12085	1552	1620	42.426407	2	536138.7434	8801207.1982	536168.7434	8801237.1982
12086	1552	1622	42.426407	2	536138.7434	8801207.1982	536168.7434	8801177.1982
12087	1553	1484	30	1	536138.7434	8801177.1982	536108.7434	8801177.1982

Figura 35. Tabela de atributos com a identificação dos oito vizinhos mais próximos de cada ponto, em que: IN_FID = numeração do ponto de origem; NEAR_FID = numeração do ponto vizinho; NEAR_DIST = distância em metros entre os dois pontos; NEAR_RANK = ordenação crescente dos vizinhos mais próximos; FROM_X = coordenada X do ponto de origem; FROM_Y = coordenada Y do ponto de origem; NEAR_X = coordenada X do ponto vizinho; NEAR_Y = coordenada Y do ponto vizinho.

Em seguida será criado um novo campo/coluna na tabela da Figura 35, "tabela_OD", com o intuito de individualizar e definir uma identificação única para cada linha. Para adicionar um novo campo, acione a ferramenta disponível em "*Data Management Tools > Fields > Add Field*" (Figura 36). Na janela aberta adicione em "*Input Table*" a tabela "tabela_OD" e atribua o nome de "*id_OD*" (identidade origem-destino) em "*Field Name*". Em "*Field Type*", selecione "*TEXT*", ou seja, tipo do campo como texto, e, por último, digite o valor 20 em "*Field Length (optional)*", significando que este terá um máximo de 20 caracteres. Para as demais opções, mantenha o padrão. Ao término desse processo, a nova coluna *id_OD* será inserida à direita na "tabela_OD", conforme se vê na Figura 37.

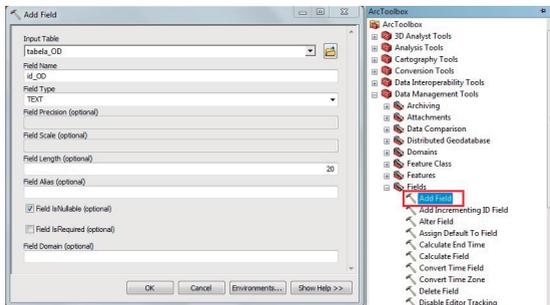
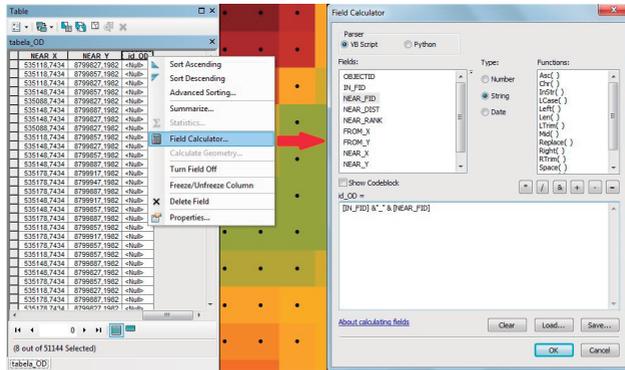


Figura 36. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “Add Field” e as configurações definidas.

OBJECTID*	IN_FID	NEAR_FID	NEAR_DIST	NEAR_RANK	FROM_X	FROM_Y	NEAR_X	NEAR_Y	id_OD
1	1	3	30	1	535080.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	
2	1	2	42,4264071	2	535080.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	
3	2	3	30	1	535118.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	
4	2	6	30	1	535118.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	
5	2	1	42,4264071	2	535118.7434	8799827.1982	535080.7434	8799827.1982	
6	2	5	42,4264071	2	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	
7	2	7	42,4264071	2	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	
8	3	1	30	1	535118.7434	8799827.1982	535080.7434	8799827.1982	
9	3	2	30	1	535118.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	
10	3	7	30	1	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	
11	3	6	42,4264071	2	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	
12	4	5	30	1	535148.7434	8799817.1982	535148.7434	8799887.1982	
13	4	10	30	1	535148.7434	8799817.1982	535178.7434	8799887.1982	
14	4	9	42,4264071	2	535148.7434	8799817.1982	535178.7434	8799847.1982	
15	4	11	42,4264071	2	535148.7434	8799817.1982	535178.7434	8799887.1982	
16	5	4	30	1	535148.7434	8799887.1982	535148.7434	8799817.1982	
17	5	6	30	1	535148.7434	8799887.1982	535148.7434	8799887.1982	
18	5	11	42,4264071	2	535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799887.1982	
19	5	2	42,4264071	2	535148.7434	8799887.1982	535118.7434	8799887.1982	
20	5	10	42,4264071	2	535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799817.1982	
21	5	12	42,4264071	2	535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799887.1982	
22	6	2	30	1	535148.7434	8799887.1982	535118.7434	8799887.1982	
23	6	5	30	1	535148.7434	8799887.1982	535148.7434	8799887.1982	
24	6	7	30	1	535148.7434	8799887.1982	535148.7434	8799827.1982	
25	6	12	30	1	535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799887.1982	
26	6	3	42,4264071	2	535148.7434	8799887.1982	535118.7434	8799827.1982	
27	6	11	42,4264071	2	535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799887.1982	
28	6	13	42,4264071	2	535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799827.1982	

Figura 37. Tabela de atributos com destaque para a nova coluna criada.

O passo seguinte é povoar o novo campo *id_OD* da tabela de atributos “*tabela_OD*” com as devidas informações. O objetivo é inserir, em cada registro (linha) dessa coluna, o número do ponto de origem e o número do ponto de destino, gerando assim uma identificação única para cada ligação. Clique com o botão direito do mouse sobre o nome “*id_OD*” na tabela; das opções listadas, selecione “*Field Calculator*” (Figura 38). Na janela que se abre, selecione a opção “*String*” em “*Type*” e insira a seguinte fórmula: *[IN_FID] & “_” & [NEAR_FID]*; em que: *[IN_FID]* = ponto de origem; *[NEAR_FID]* = ponto de destino; *&* = símbolo para concatenação; “*_*” = caractere escolhido como separador dos identificadores Origem e Destino. O resultado é apresentado na Figura 39.



Fonte: ArcGIS 10.3.

Figura 38. Caminho de acesso para a ferramenta "Field Calculator..." e expressão utilizada para concatenação das informações.

The screenshot shows the result of the Field Calculator operation. The 'ID_OD' column now contains concatenated values of 'IN_FID' and 'NEAR_FID' separated by a space. Red arrows point to the 'ID_OD' column and the 'IN_FID' and 'NEAR_FID' columns.

OBJECTID	IN_FID	NEAR_FID	NEAR_DIST	NEAR_RANK	FROM_X	FROM_Y	NEAR_X	NEAR_Y	NEAR_ANGLE	ID_OD
1		3	30	1	535050.7434	8799927.1982	535118.7434	8799957.1982	0	1_3
2	1	2	42,428407	2	535050.7434	8799927.1982	535118.7434	8799957.1982	45	1_2
3	1	3	30	1	535118.7434	8799957.1982	535118.7434	8799957.1982	-45	1_3
4	2	2	42,428407	1	535118.7434	8799957.1982	535148.7434	8799957.1982	0	2_2
5	2	1	42,428407	2	535118.7434	8799957.1982	535088.7434	8799927.1982	-135	2_1
6	3	1	42,428407	2	535118.7434	8799957.1982	535148.7434	8799957.1982	45	3_1
7	2	7	42,428407	2	535118.7434	8799957.1982	535148.7434	8799927.1982	-45	2_7
8	3	1	30	1	535118.7434	8799957.1982	535088.7434	8799927.1982	135	3_1
9	3	2	30	1	535118.7434	8799957.1982	535118.7434	8799957.1982	90	3_2
10	3	7	30	1	535118.7434	8799957.1982	535148.7434	8799927.1982	0	3_7
11	3	6	42,428407	2	535118.7434	8799957.1982	535148.7434	8799957.1982	45	3_6
12	4	5	30	1	535148.7434	8799917.1982	535148.7434	8799987.1982	-90	4_5
13	4	10	30	1	535148.7434	8799917.1982	535178.7434	8799917.1982	-45	4_10
14	4	9	42,428407	2	535148.7434	8799917.1982	535178.7434	8799947.1982	45	4_9
15	4	11	42,428407	2	535148.7434	8799917.1982	535178.7434	8799987.1982	-45	4_11
16	5	4	30	1	535148.7434	8799987.1982	535148.7434	8799917.1982	90	5_4
17	5	6	30	1	535148.7434	8799987.1982	535148.7434	8799957.1982	-90	5_6
18	5	11	30	1	535148.7434	8799987.1982	535178.7434	8799987.1982	0	5_11
19	5	2	42,428407	2	535148.7434	8799987.1982	535118.7434	8799957.1982	-135	5_2
20	6	2	30	1	535148.7434	8799957.1982	535178.7434	8799917.1982	-45	6_2
21	5	12	42,428407	2	535148.7434	8799987.1982	535178.7434	8799957.1982	-45	5_12
22	6	2	30	1	535148.7434	8799957.1982	535118.7434	8799957.1982	90	6_2
23	6	5	30	1	535148.7434	8799957.1982	535148.7434	8799987.1982	90	6_5
24	6	7	30	1	535148.7434	8799957.1982	535148.7434	8799927.1982	-90	6_7
25	6	12	30	1	535148.7434	8799957.1982	535178.7434	8799957.1982	0	6_12
26	6	3	42,428407	2	535148.7434	8799957.1982	535118.7434	8799927.1982	-135	6_3
27	6	11	42,428407	2	535148.7434	8799957.1982	535178.7434	8799987.1982	-45	6_11
28	6	13	42,428407	2	535148.7434	8799957.1982	535178.7434	8799927.1982	-45	6_13
29	7	3	30	1	535148.7434	8799927.1982	535118.7434	8799927.1982	180	7_3
30	7	6	30	1	535148.7434	8799927.1982	535148.7434	8799957.1982	90	7_6
31	7	13	30	1	535148.7434	8799927.1982	535178.7434	8799927.1982	0	7_13

Figura 39. Resultado da concatenação dos identificadores, com destaque para o número do ponto de origem (IN_FID), número do vizinho (NEAR_FID) e a concatenação das numerações origem-destino (ID_OD).

Na sequência serão adicionadas as informações da elevação dos pontos (coordenada Z), na "tabela_OD". Para isso, esses valores serão importados da tabela de atributos da camada vetorial "pontos_3D_single". A ferramenta utilizada será "Join Field", disponível em "Data Management Tools > Joins > Join Field" (Figura 40). Na janela aberta, em "Input Table", selecione a tabela "tabela_OD"; em seguida, em "Input Join Field" selecione "IN_FID", ou seja, o campo-chave para união das tabelas; em "Join Table", selecione "pontos_3D_single", ou

seja, buscar essa informação na tabela de atributos dessa classe de feições. Em *"Output Join Field"*, selecione *"OBJECTID"* e, por último, marque a opção *"POINT_Z"*, para anexar apenas essa informação, que é a de interesse.

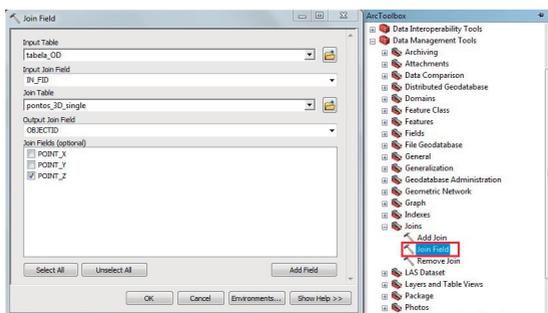


Figura 40. Acesso e destaque para a ferramenta *"Join Field"* e as configurações definidas.

O próximo passo é alterar o nome da coluna com as informações de elevação dos pontos de origem. Para isso acesse a ferramenta *"Alter Field"*, disponível em *"Data Management Tools > Fields > Alter Field"* (Figura 41). Na janela aberta adicione *"tabelas_OD"* em *"Input Table"*; em *"Field Name"*, selecione o campo que deseja alterar o nome, neste caso *"POINT_Z"*; em *"New Field Name (optional)"* atribui-se o novo nome como *"z_O"* (informação de elevação para o ponto de origem), e marque a opção *"Clear Alias"*, para que não seja usado apelido para o campo. Com isso será alterado o nome da coluna, evitando possíveis conflitos e enganos nas próximas etapas (Figura 42).

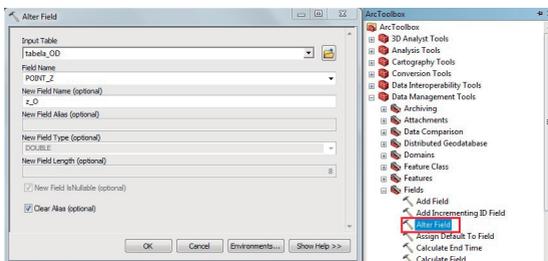


Figura 41. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta *"Alter Field"* e as configurações definidas.

The figure shows two screenshots of a table editor window. The left screenshot shows a table with columns: NEAR_X, NEAR_Y, NEAR_ANGLE, ID, and POINT_Z. The right screenshot shows the same table, but the 'ID' column header has been changed to 'z_D'. A red arrow points from the 'ID' column header in the left screenshot to the 'z_D' column header in the right screenshot.

Figura 42. Destaque para a alteração do nome da coluna na tabela de atributos com a informação da elevação de cada ponto.

Deve-se agora repetir os dois últimos processos, visando inserir os valores de elevação dos pontos de destino. Novamente, acesse “*Data Management Tools > Joins > Join Field*” (Figura 43). Na janela aberta em “*Input Join Field*” ao invés de “*IN_FID*” selecione “*NEAR_FID*”, ou seja, o ponto de destino. As demais opções seguem de acordo com o processo anterior.

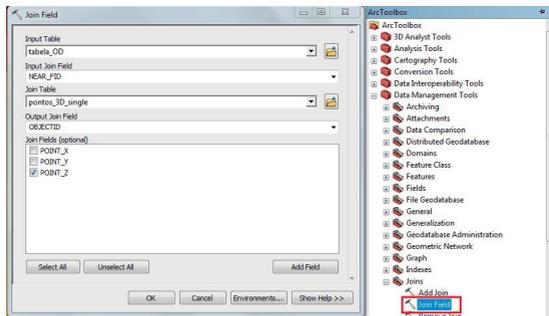


Figura 43. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “Join Field” e as configurações definidas para obtenção dos valores de altitude dos pontos de destino.

Novamente altera-se o nome da coluna das informações de elevação para os pontos de destino: “*Data Management Tools > Fields > Alter Field*”, utilizando os mesmos passos da etapa anterior, apenas modificando-se para “*z_D*” em “*Field Name*”, ou seja, informação de elevação do ponto de destino (Figura 44).

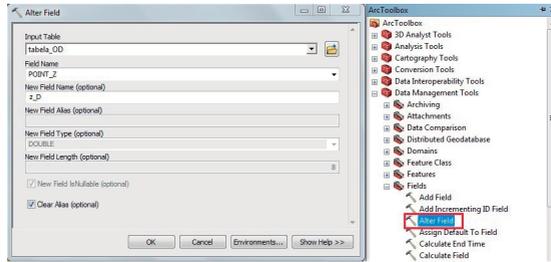


Figura 44. Acesso e destaque para a ferramenta “Alter Field” e as configurações definidas.

Ao final, na tabela de atributos serão exibidas as informações de elevação dos pontos de origem (z_O) e de destino (z_D) (Figura 45).

OBJECTID	IN_FID	NEAR_FID	NEAR_DIST	NEAR_RANK	FROM_X	FROM_Y	NEAR_X	NEAR_Y	NEAR_ANGLE	Z_O	Z_D
1	3	30	535086.7434	8799857.1982	535118.7434	8799857.1982	0	1.3	278	278	
2	1	42,428407	2 535086.7434	8799857.1982	535118.7434	8799857.1982	45	1.2	278	282	
3	2	3	30	1 535118.7434	8799857.1982	535118.7434	8799857.1982	-50	2.2	282	278
4	2	6	30	1 535118.7434	8799857.1982	535118.7434	8799857.1982	0	2.6	282	283
5	2	1	42,428407	2 535118.7434	8799857.1982	535086.7434	8799857.1982	-135	4.1	282	278
6	5	5	42,428407	2 535118.7434	8799857.1982	535148.7434	8799857.1982	45	2.5	282	285
7	2	7	42,428407	2 535118.7434	8799857.1982	535148.7434	8799857.1982	45	2.2	282	281
8	3	1	30	1 535118.7434	8799857.1982	535086.7434	8799857.1982	180	3.1	278	278
9	3	2	30	1 535118.7434	8799857.1982	535118.7434	8799857.1982	90	3.2	278	282
10	3	7	30	1 535118.7434	8799857.1982	535148.7434	8799857.1982	0	3.2	278	281
11	3	6	42,428407	2 535118.7434	8799857.1982	535148.7434	8799857.1982	45	3.6	278	283
12	4	5	30	1 535148.7434	8799917.1982	535148.7434	8799857.1982	-60	4.5	284	285
13	4	10	30	1 535148.7434	8799917.1982	535178.7434	8799917.1982	0	4.1	284	284
14	4	9	42,428407	2 535148.7434	8799917.1982	535178.7434	8799857.1982	45	4.9	284	281
15	4	11	42,428407	2 535148.7434	8799917.1982	535178.7434	8799857.1982	-45	4.1	284	286
16	5	4	30	1 535148.7434	8799887.1982	535148.7434	8799917.1982	90	5.4	285	284
17	5	6	30	1 535148.7434	8799887.1982	535148.7434	8799887.1982	-90	5.6	285	283
18	5	11	30	1 535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799887.1982	0	5.1	285	286
19	5	2	42,428407	2 535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799857.1982	-135	5.2	285	282
20	5	10	42,428407	2 535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799917.1982	45	5.1	285	284
21	5	12	42,428407	2 535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799857.1982	-45	5.1	285	285
22	6	2	30	1 535148.7434	8799857.1982	535178.7434	8799857.1982	180	6.2	283	282
23	6	5	30	1 535148.7434	8799857.1982	535148.7434	8799887.1982	90	6.3	283	285
24	6	7	30	1 535148.7434	8799857.1982	535148.7434	8799857.1982	-90	6.2	283	281
25	6	12	30	1 535148.7434	8799857.1982	535178.7434	8799857.1982	0	6.1	283	285
26	6	3	42,428407	2 535148.7434	8799857.1982	535118.7434	8799857.1982	-135	6.2	283	279
27	6	11	42,428407	2 535148.7434	8799857.1982	535178.7434	8799887.1982	45	6.1	283	286
28	6	13	42,428407	2 535148.7434	8799857.1982	535178.7434	8799857.1982	-45	6.1	283	282
29	7	3	30	1 535148.7434	8799857.1982	535178.7434	8799857.1982	180	7.2	281	279

Figura 45. Tabela de atributos com destaque para as colunas com os nomes alterados, para a informação da elevação dos pontos de origem (z_O) e destino, vizinho(z_D).

A próxima etapa será de fato a criação das linhas ou redes ligando os pontos de elevação, a partir dos pares de coordenadas origem-destino. Para isso será utilizada a ferramenta “X Y To Line”, acessada em “Data Management Tools > Features > X Y To Line” (Figura 46). Na janela que se abre, as seguintes informações devem ser adicionadas: em “Input Table” adicione a tabela “tabela_OD”; em “Output Features Class” selecione o local para salvar a camada vetorial de nome “arco_OD”, ou seja, as linhas ligando os pontos de altitude da origem para o destino; em “Start X Field” e “Start Y Field” selecione “FROM_X” e “FROM_Y”, respectivamente, ou seja, indique os campos de X e Y

de onde partirão as linhas; em *"End X Field"* e *"End Y Field"* selecione *"NEAR_X"* e *"NEAR_Y"*, respectivamente, ou seja, os pontos finais de ligação da linha em X e Y; em *"Line Type (optional)"* mantenha o padrão *"GEODESIC"*. Em *"ID (optional)"*, selecione *"id_OD"* para que essa informação seja adicionada no novo arquivo de linha a ser gerado. Por último, selecione a referência espacial em *"Spatial Reference (optional)"* de acordo com seu projeto, neste caso *"WGS_1984_UTM_Zone_19S"*, lembrando que deve estar em um sistema de coordenadas planas.

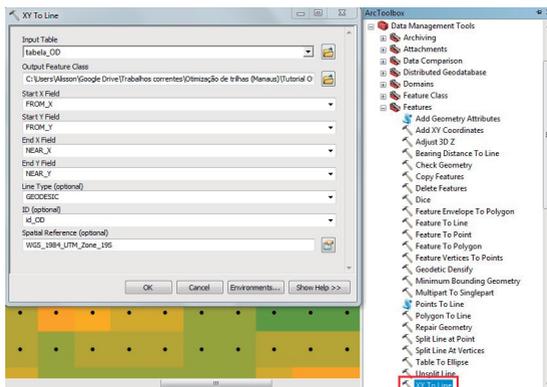


Figura 46. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta *"X Y To Line"* e as configurações definidas.

Como resultado é criada uma feição vetorial do tipo linha para cada registro da tabela *"tabela_OD"*, sendo possível a visualização da rede interligando os pontos, quais pontos se ligam a um determinado ponto, a distância entre eles e suas coordenadas (Figura 47).

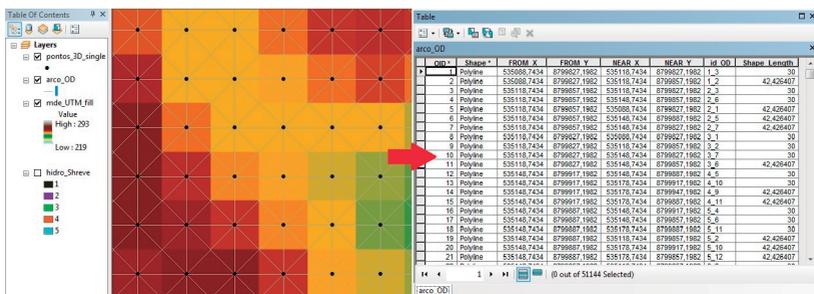


Figura 47. Rede interligando os pontos, contendo as informações dos pontos de origem e destino de cada segmento de linha.

Observa-se, na tabela (Figura 47), que são criadas linhas de “ida” e de “volta” do ponto de origem para o destino. Porém, essa informação de “volta” apenas duplica os dados (caminho 1_2 é igual ao 2_1), não tendo utilidade nesse caso. Dessa maneira, esses dados devem ser deletados por meio da ferramenta “Delete Identical”, disponível em “Data Management Tools > General > Delete Identical” (Figura 48). Na janela que é aberta, selecione o arquivo “arco_OD” em “Input Dataset” e, em seguida, selecione a opção “Shape” em “Field(s)”. Para as demais opções, mantenha o padrão.

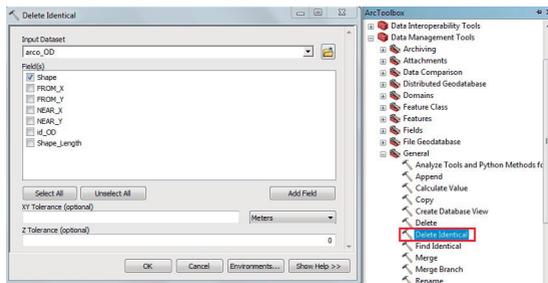


Figura 48. Acesso e destaque para a ferramenta “Delete Identical” e as configurações definidas.

Observando-se o número de registros da tabela de atributos (Figura 49), percebe-se que a quantidade de linhas ou informações é reduzida exatamente pela metade, devido à exclusão dos dados replicados.

OID	Shape	FROM_X	FROM_Y	NEAR_X	NEAR_Y	OID	Shape	FROM_X	FROM_Y	NEAR_X	NEAR_Y	OID	Shape	Length
1	Polyline	535080.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	1	Polyline	535080.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	1	30	42,428467
2	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	2	Polyline	535080.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	2	30	42,428467
3	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	3	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	3	30	30
4	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	4	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	4	30	42,428467
5	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535080.7434	8799827.1982	5	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	5	30	42,428467
6	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	6	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535080.7434	8799827.1982	6	30	42,428467
7	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	7	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	7	30	42,428467
8	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535080.7434	8799827.1982	8	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	8	30	42,428467
9	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	9	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	9	30	42,428467
10	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	10	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	10	30	42,428467
11	Polyline	535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	11	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	11	30	42,428467
12	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	12	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	12	30	42,428467
13	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	13	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	13	30	42,428467
14	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	14	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	14	30	42,428467
15	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	15	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	15	30	42,428467
16	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	16	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	16	30	42,428467
17	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	17	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	17	30	42,428467
18	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	18	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	18	30	42,428467
19	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	19	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	19	30	42,428467
20	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	20	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	20	30	42,428467
21	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	21	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	21	30	42,428467
22	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	22	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	22	30	42,428467
23	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	23	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	23	30	42,428467
24	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	24	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	24	30	42,428467
25	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	25	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	25	30	42,428467
26	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	26	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	26	30	42,428467
27	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	27	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	27	30	42,428467
28	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	28	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	28	30	42,428467
29	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	29	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	29	30	42,428467
30	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	30	Polyline	535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	30	30	42,428467

Figura 49. Destaque para a redução pela metade da quantidade de dados, após remoção de dados duplicados de origem e destino.

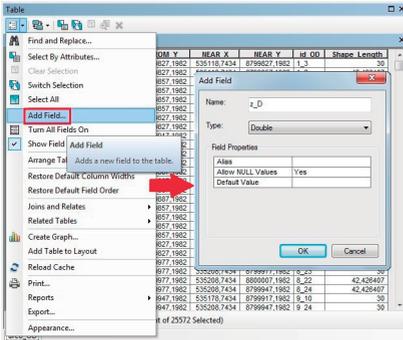


Figura 51. Criação de um novo campo/coluna ("z_D") por meio da tabela de atributos da feição.

Ao final desse processo, os dois novos campos criados possuirão valores nulos para todos os registros da tabela (Figura 52).

FROM_X	FROM_Y	NEAR_X	NEAR_Y	id_OD	Shape_Length	z_D	z_D
536088.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	1_3	30	#Null	#Null
536088.7434	8799827.1982	535118.7434	8799827.1982	1_2	42,426407	#Null	#Null
535118.7434	8799857.1982	535118.7434	8799827.1982	2_3	30	#Null	#Null
535118.7434	8799857.1982	535148.7434	8799827.1982	2_2	30	#Null	#Null
535118.7434	8799857.1982	535148.7434	8799887.1982	2_5	42,426407	#Null	#Null
535118.7434	8799857.1982	535148.7434	8799827.1982	2_2	42,426407	#Null	#Null
535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799827.1982	1_7	30	#Null	#Null
535118.7434	8799827.1982	535148.7434	8799857.1982	1_6	42,426407	#Null	#Null
535148.7434	8799917.1982	535148.7434	8799827.1982	4_5	30	#Null	#Null
535148.7434	8799917.1982	535178.7434	8799917.1982	4_10	30	#Null	#Null
535148.7434	8799917.1982	535178.7434	8799947.1982	4_9	42,426407	#Null	#Null
535148.7434	8799917.1982	535178.7434	8799887.1982	4_11	42,426407	#Null	#Null
535148.7434	8799857.1982	535148.7434	8798857.1982	5_8	30	#Null	#Null
535148.7434	8799857.1982	535178.7434	8799857.1982	5_11	30	#Null	#Null
535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799917.1982	5_10	42,426407	#Null	#Null
535148.7434	8799887.1982	535178.7434	8799827.1982	5_12	42,426407	#Null	#Null
535148.7434	8799857.1982	535148.7434	8799827.1982	6_2	30	#Null	#Null
535148.7434	8799857.1982	535178.7434	8799827.1982	6_12	30	#Null	#Null
535148.7434	8799857.1982	535178.7434	8799887.1982	6_11	42,426407	#Null	#Null
535148.7434	8799857.1982	535178.7434	8799827.1982	6_13	42,426407	#Null	#Null
535148.7434	8799827.1982	535178.7434	8799827.1982	7_3	30	#Null	#Null

Figura 52. Tabela de atributos com destaque para os dois novos campos/coluna criados.

O próximo passo será adicionar um índice de atributo na tabela "tabela_OD". Esse índice será importante para acelerar a identificação dos registros que satisfazem a uma consulta por atributos. Será utilizada a ferramenta "Add Attribute Index", disponível em "Data Management Tools > Indexes > Add Attribute Index" (Figura 53). Na janela aberta, em "Input Table" selecione "arco_OD" e, em "Fields to Index", marque o campo "id_OD". Em "Index Name (optional)" digite "id_OD_index" e marque a opção "Unique (optional)", para indicar que inexistem valores repetidos para esse atributo. Esse processo ocorre internamente, portanto, visualmente, não haverá diferença alguma. Para verificar se a criação do índice foi bem-sucedida, basta abrir a tabela de atributos e visualizar o campo "id_OD", que deverá exibir o símbolo "*" após o nome no cabeçalho.

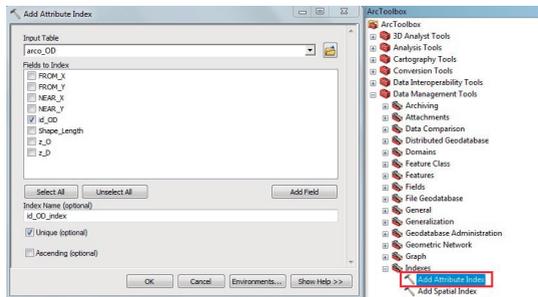


Figura 53. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “Add Attribute Index” e as configurações definidas para a tabela “arco_OD”.

Repita esse procedimento para a tabela “tabela_OD”; as demais informações se mantêm exatamente como na etapa anterior (Figura 54).

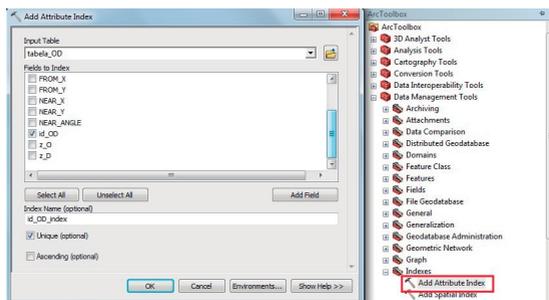


Figura 54. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “Add Attribute Index” e as configurações definidas para a tabela “tabela_OD”.

Pode-se agora fazer a união temporária entre as tabelas de atributos de “arco_OD” e “tabela_OD”. Para isso será utilizada a ferramenta “Joins and Relates”. Para acessá-la, no painel à esquerda da janela do ArcMap (*Table of Contents*), posicione o cursor sobre o nome da camada “arco_OD” e clique o botão direito do mouse. Na lista de opções, selecione “Joins and Relates > Join...” (Figura 55). Na janela que se abre, selecione “Join attributes from a table” para efetuar uma união baseada somente nos valores do atributo selecionado; no campo “1”, selecione o atributo “id_OD”, que será então usado como campo-chave para estabelecer as conexões entre os registros das tabelas; no campo “2”,

selecione “*tabela_OD*”, cujos registros serão pareados com os da tabela de atributos de “*arco_OD*”; no campo “3”, selecione o campo “*id_OD*” da tabela “*tabela_OD*”; deixe as demais informações da forma em que se encontram. Finalmente clique em *Ok* para efetuar a união das duas tabelas.

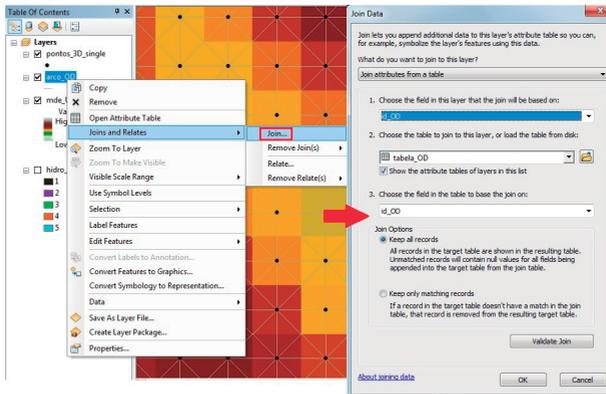


Figura 55. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Join...*” e as configurações definidas.

Ao abrir a tabela de atributos da camada “*arco_OD*”, percebe-se que todas as informações da tabela “*tabela_OD*” são exibidas à direita da sua última coluna original, i.e., *z_D*. Pode-se agora copiar os valores de elevação para os campos apropriados. Para isso, coloque a feição “*arco_OD*” no modo de edição (“*Editor > start editing*”); em seguida, abra a tabela de atributos dessa feição, posicione o cursor sobre o nome da coluna “*z_O*” e clique com o botão direito do mouse e selecione “*Field Calculator*” (Figura 56). Na janela que se abre, no painel “*Fields*”, escolha a opção “*tabela_OD.z_O*” com um clique duplo. Esse campo será adicionado no painel inferior, indicando que a coluna “*z_O*” da tabela de atributos de “*arco_OD*” será preenchida com os respectivos valores do campo *z_O* da tabela “*tabela_OD*”.

Repita o mesmo processo para o campo “*z_D*”; selecionando “*tabela_OD.z_D*” na calculadora de campo (Figura 57).

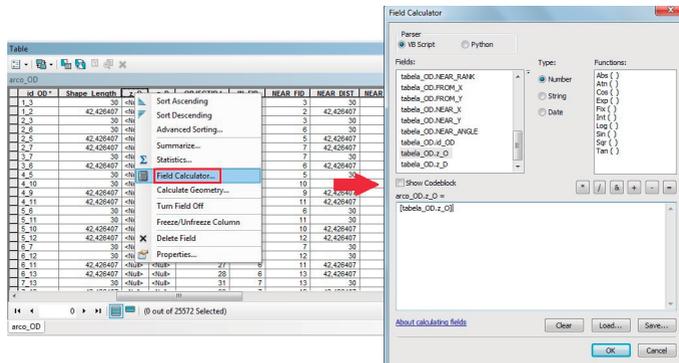


Figura 56. Acesso e destaque para a ferramenta “Field Calculator...” e expressão utilizada para copiar os valores da altitude dos pontos de origem.

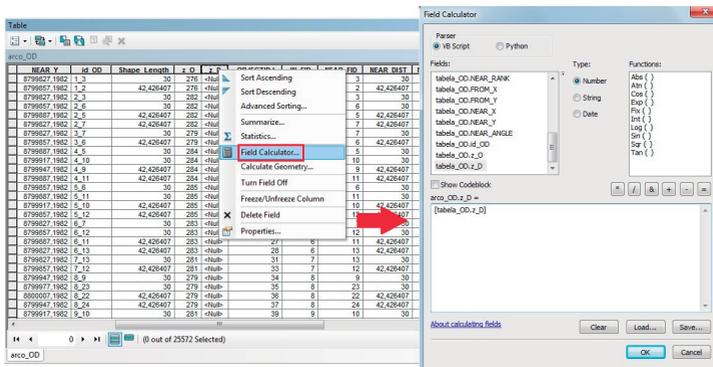


Figura 57. Acesso e destaque para a ferramenta “Field Calculator...” e expressão utilizada para copiar os valores de altitudes dos pontos de destino.

Após esses procedimentos, bastará desfazer a união temporária, na própria tabela de atributos, clicando na opção “Table Options > Joins e Relates > Remove Join(s) > Remove all joins” e finalizar o modo de edição da feição “arco_OD”, clicando em “Stop Editing”, salvando as alterações.

Transformação de feição 2D em objeto 3D

Depois de finalizada a preparação da camada “arco_OD”, é necessário que a informação da elevação ou altitude fique associada internamente a cada uma de suas extremidades, passando assim a ser parte

integrante de cada feição. Para isso será utilizada a ferramenta “*Interpolate Shape*”, disponível em “*3D Analyst Tools > Functional Surface > Interpolate Shape*” (Figura 58). Na janela aberta, em “*Input Surface*” adicione o MDE criado no processo “*Fill*”, i.e., “*mde_UTM_fill*”; em “*Input Feature Class*” selecione a camada “*arco_OD*” e, em “*Output Feature Class*”, aponte o local para salvar a camada resultante, nomeando-a “*arco_OD_3D*”. Marque a opção “*Interpolate Vertices Only (optional)*” e deixe as demais opções inalteradas. Com esse processo, as feições são convertidas para feições espaciais do tipo linha 3D.

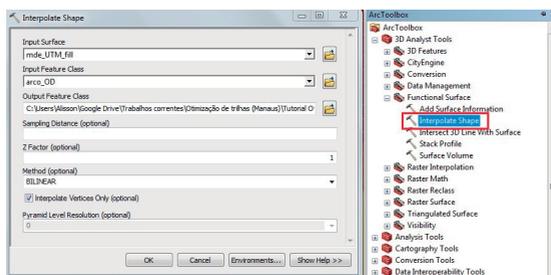


Figura 58. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Interpolate Shape*” e as configurações definidas.

Comprimento real de um arco

A distância calculada entre dois pontos alinhados na direção Norte-Sul ou Leste-Oeste é de 30 m; já para pontos alinhados na direção Nordeste-Sudoeste ou Noroeste-Sudeste, a distância é igual a 42,43 m, i.e., $30\sqrt{2}$. Entretanto, isso só é válido se ambos os pontos tiverem a mesma altitude. Se houver diferença de altitude entre os pontos, a distância real será maior. Essa distância real ou tridimensional entre os pontos pode ser calculada pela distância euclidiana, aplicando-se o teorema de Pitágoras (Figura 59).

Será utilizada a ferramenta “*Add Field*” para a criação de um campo que represente a distância real, tridimensional. Novamente, com a tabela de atributos da feição “*arco_OD_3D*” aberta, vá até a barra de ferramentas superior em “*Table Options > Add field...*” (Figura 60). Na janela que

se abre atribua o nome "*dist_OD_3D*", para armazenar a distância real tridimensional entre os pontos de origem e destino; depois selecione a opção "*Double*" em "*Type*".

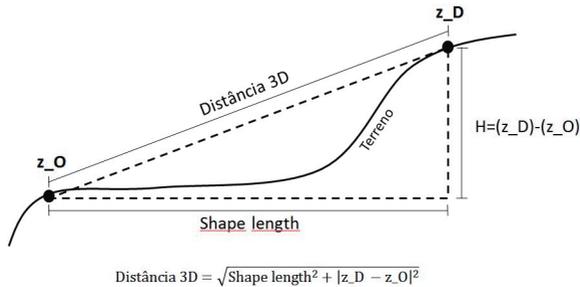


Figura 59. Aplicação do teorema de Pitágoras, em que: *Distância 3D* = distância real a ser calculada; *z_O* = altitude do ponto de origem; *z_D* = altitude do ponto de destino; *H* = diferença absoluta de altitude entre os pontos de destino e origem; *Shape length* = distância horizontal (projetada) entre os pontos de origem e destino.

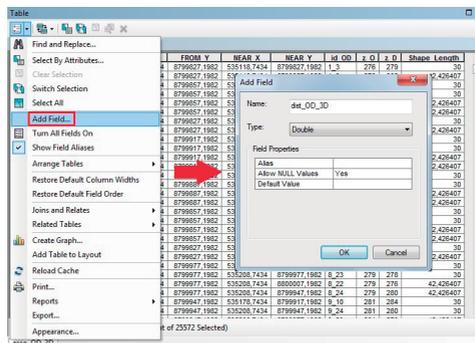


Figura 60. Criação de um novo campo/coluna ("*dist_OD_3D*") pela interface da tabela de atributos da classe de feições.

A próxima etapa será o cálculo dos respectivos valores para esse novo campo. Para isso, com a tabela de atributos de "*arco_OD_3D*" aberta, posicione o cursor no nome da coluna "*dist_OD_3D*", clique com o botão direito do mouse e selecione a opção "*Field Calculator*" (Figura 61). Na janela que se abre, selecione a opção "*Python*" em "*Parser*" para trabalhar com a linguagem *Python*. Depois, posicione o

cursor dentro do painel inferior e adicione a seguinte expressão: “*math.sqrt(math.pow(!Shape_Length!, 2) + math.pow(math.fabs(!Z_D! - !Z_O!), 2))*”, que equivale a $\sqrt{(Shape\ length^2 + |z_D - z_O|^2)}$. A seguir, clique no botão **OK** para executar a expressão para todos os registros da tabela de atributos.

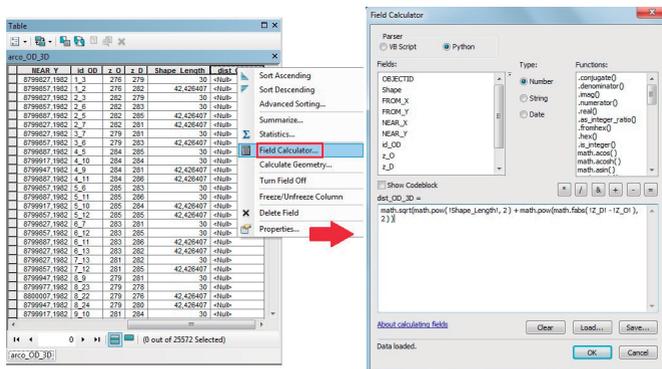


Figura 61. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Field Calculator...*” e expressão utilizada para calcular a distância real ou tridimensional entre dois pontos em diferentes cotas.

Ao visualizar a tabela de atributos atualizada, percebe-se que a distância 3D, de fato, difere da distância horizontal quando as extremidades do arco não estão na mesma altitude (Figura 62).

The image shows a table of attributes for the 'arco_OD_3D' feature class. The table has columns: NEAR_Y, ID_OD, Z_D, Z_O, Shape_Length, and dist_3D. Red arrows point to the 'dist_3D' column, highlighting the difference between the projected distance (Shape_Length) and the real distance (dist_3D).

NEAR_Y	ID_OD	Z_D	Z_O	Shape_Length	dist_3D	
8799027	1802	11	27	291	42,53241	
8799027	1802	12	13	285	30,149627	
8799027	1802	12	27	283	30,3066593	
8799027	1802	12	26	285	288	42,426407
8799027	1802	12	28	285	279	42,53241
8799027	1802	13	28	282	278	30,265492
8799027	1802	13	27	282	283	42,426407
880037	1802	14	16	280	281	30,149627
880037	1802	14	23	280	285	30,149627
880037	1802	14	32	280	284	42,414492
880037	1802	14	34	280	287	42,43018
880037	1802	15	16	281	289	30,3066593
880037	1802	15	34	281	287	30,265492
880037	1802	15	33	281	288	42,426407
880037	1802	15	35	281	288	42,426407

Figura 62. Tabela de atributos da feição “*arco_OD_3D*” destacando-se a diferença entre as distâncias projetadas e real.

Vários campos ou colunas presentes na tabela de atributos não serão necessários em nenhum momento; portanto, a exclusão dessas colunas pode ser feita sem prejuízo, facilitando bastante a visualização dos campos e dos respectivos valores. Vá em “*Data Management Tools > Fields > Delete Field*” (Figura 63). Com a janela aberta, selecione a

opção “*arco_OD_3D*” na lista “*Input Table*” e marque no painel “*Drop Field*” os campos “*FROM_X*”, “*FROM_Y*”, “*NEAR_X*” e “*NEAR_Y*”. A exclusão de dados desnecessários é importante também para melhorar e otimizar o desempenho do software, pois essas informações ocupam memória e espaço em disco durante os processamentos.

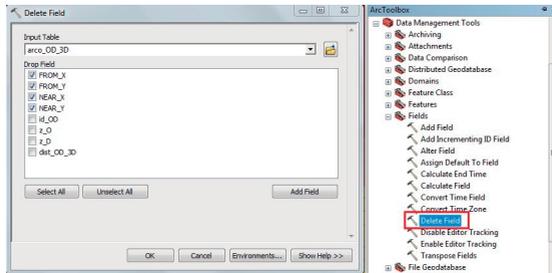


Figura 63. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Delete Field...*” e as configurações definidas.

Declividade de um arco

Nesta etapa será calculada a declividade de cada arco, ou seja, a inclinação do segmento de reta conectando os pontos de origem e destino. Essa informação será utilizada mais adiante para calcular a velocidade de deslocamento no terreno. Novamente, deve-se criar novos campos na tabela de atributos da classe de feições “*arco_OD_3D*” para receber tais valores. Siga o procedimento já efetuado para criação de uma nova coluna/campo. Com a tabela de atributos da classe de feições “*arco_OD_3D*” aberta vá até a barra de ferramentas superior em “*Table Options > Add field...*” (Figura 64). Com a janela aberta atribua o nome “*incl_dec_OD*”, ou seja, a inclinação em graus decimais da origem para o destino; depois selecione a opção “*Double*” em “*Type*” para maior precisão.

Em seguida, adicione um novo campo, nomeando-o “*incl_dec_DO*”, para receber os valores da inclinação, em decimais, do destino para a origem, i.e., no sentido inverso (Figura 65). Esses resultados serão utilizados nos próximos passos do cálculo da velocidade, uma vez que a velocidade para se percorrer um trecho em acive poderá diferir daquela para se percorrer o mesmo trecho morro abaixo.

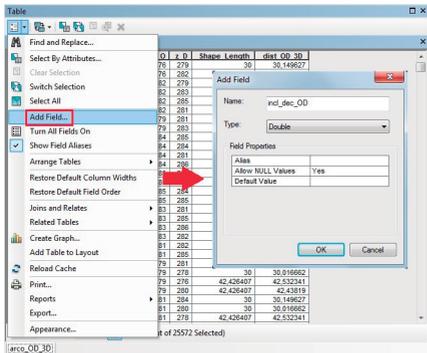


Figura 64. Criação de um novo campo/coluna ("incl_dec_OD") por meio da tabela de atributos da feição.

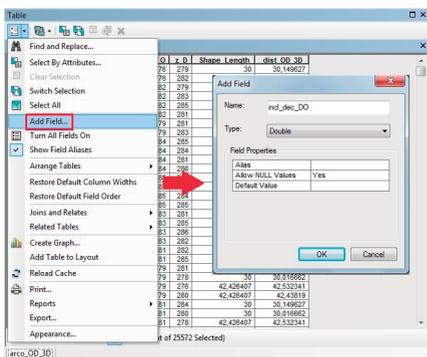


Figura 65. Criação de um novo campo/coluna ("incl_dec_DO") por meio da tabela de atributos da feição.

Os campos criados serão preenchidos com os resultados do cálculo das inclinações da rampa nos dois sentidos. A inclinação da rampa é dada pela tangente do ângulo entre um plano horizontal e o segmento unindo os pontos origem e destino ou destino e origem (Figura 66).

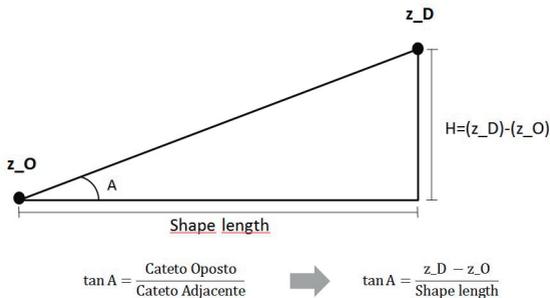


Figura 66. Fórmula para o cálculo da inclinação entre dois pontos expressa em graus decimais.

Com a tabela de atributos da classe de feições “*arco_OD_3D*” aberta, vá primeiro até o campo “*incl_dec_OD*”, clique com o botão direito do mouse sobre o nome e selecione “*Field Calculator*” (Figura 67). No painel inferior dessa janela, adicione a seguinte expressão “ $([z_D] - [z_O]) / [Shape_Length]$ ”.

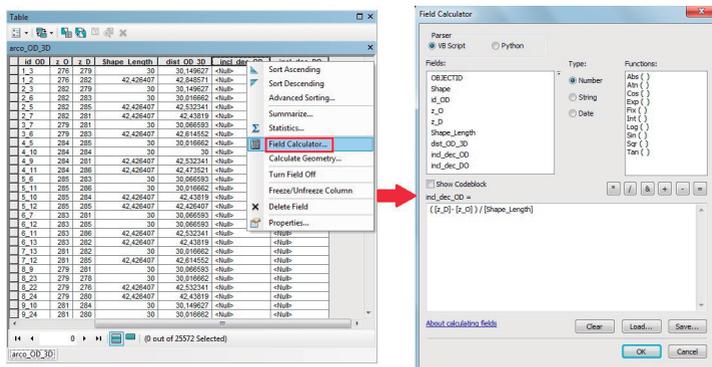


Figura 67. Acesso e destaque para a ferramenta “*Field Calculator...*” e a expressão utilizada para calcular a inclinação entre origem e destino.

Agora faça o mesmo para preencher o campo “*incl_dec_DO*”. Use a mesma expressão, apenas invertendo a posição do “*z_D*” e “*z_O*” por se tratar do caminho inverso, inserindo $([z_O] - [z_D]) / [shape_length]$, (Figura 68).

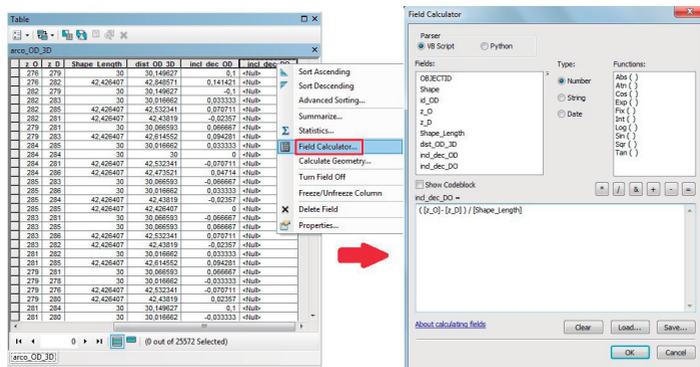


Figura 68. Acesso e destaque para a ferramenta “*Field Calculator...*” e expressão utilizada para calcular a inclinação no sentido destino-origem.

Ao final, a inclinação em valores decimais será calculada e exibida para ambos os sentidos de se percorrer cada arco, ou seja, origem-destino e destino-origem, sendo as respectivas inclinações exatamente o inverso aditivo uma da outra (Figura 69).

OBJECTID	Shape	id OD	x O	x D	Shape Length	dist OD 3D	incl desc OP	incl desc OD
1	Polyline Z	1_3	276	279	30	30,148627	0,11	-0,1
2	Polyline Z	1_4	276	282	42,426407	-0,849571	0,141421	-0,141421
3	Polyline Z	2_3	282	279	30	30,148627	-0,11	0,1
4	Polyline Z	2_4	282	283	30	30,016662	0,033333	-0,033333
5	Polyline Z	2_5	282	285	42,426407	-0,532341	0,070711	-0,070711
6	Polyline Z	2_7	282	281	42,426407	-0,43819	-0,02957	0,02957
7	Polyline Z	3_7	279	281	30	30,066593	0,066667	-0,066667
8	Polyline Z	3_8	279	283	42,426407	-0,214552	0,094261	-0,094261
9	Polyline Z	4_5	284	285	30	30,016662	0,033333	-0,033333
10	Polyline Z	4_10	284	284	30	30	0	0
11	Polyline Z	4_8	284	281	42,426407	-0,532341	-0,070711	0,070711
12	Polyline Z	4_11	284	286	42,426407	-0,473521	0,04714	-0,04714
13	Polyline Z	5_8	283	283	30	30,006593	-0,066667	0,066667
14	Polyline Z	5_11	285	286	30	30,016662	0,033333	-0,033333
15	Polyline Z	5_10	285	284	42,426407	-0,43819	-0,02957	0,02957
16	Polyline Z	5_12	285	285	42,426407	-0,426407	0	0
17	Polyline Z	6_7	281	281	30	30,006593	-0,066667	0,066667
18	Polyline Z	6_12	281	285	30	30,006593	0,066667	-0,066667
19	Polyline Z	6_11	281	286	42,426407	-0,532341	0,070711	-0,070711
20	Polyline Z	6_13	281	282	42,426407	-0,43819	-0,02957	0,02957
21	Polyline Z	7_13	281	282	30	30,016662	0,033333	-0,033333
22	Polyline Z	7_12	281	283	42,426407	-0,014552	0,094261	-0,094261
23	Polyline Z	8_8	279	281	30	30,006593	0,066667	-0,066667
24	Polyline Z	8_23	279	276	30	30,016662	-0,033333	0,033333
25	Polyline Z	8_22	279	276	42,426407	-0,532341	-0,070711	0,070711
26	Polyline Z	8_24	279	289	42,426407	-0,43819	-0,02957	0,02957
27	Polyline Z	8_19	281	284	30	30,148627	0,11	-0,1
28	Polyline Z	8_24	281	289	30	30,016662	-0,033333	0,033333
29	Polyline Z	8_23	281	276	42,426407	-0,532341	-0,070711	0,070711

Figura 69. Tabela de atributos da classe de feições “arco_OD_3D” com destaque para as inclinações dos percursos nos sentidos origem-destino e destino-origem.

Velocidade de Tobler

No presente estudo, a inclinação do relevo (declive ou aclave) afeta diretamente a velocidade humana para percorrer caminhos declivosos. Para se estimar a velocidade de caminhada em função da inclinação do percurso, será adotada a função de Tobler (TOBLER, 1993), assim definida:

$$W = 6e^{-3,5| \frac{dh}{dx} | + 0,05}$$

$$\frac{dh}{dx} = S = \tan \theta$$

Em que:

W = velocidade de caminhada (km/h)

S = inclinação da rampa

dh = diferença de elevação entre os pontos extremos da rampa

dx = distância horizontal em linha reta entre os extremos da rampa

θ = ângulo entre as extremidades da rampa.

A regra de Tobler é uma função exponencial para determinação da velocidade de caminhada, levando em conta o ângulo de inclinação do terreno, seja por aclave ou declive (SÁSKA; DOMBAY, 2012; HERZOG,

2010; TOBLER, 1993) (Figura 70). Para terrenos planos, i.e., $dh = 0$, a velocidade de caminhada é igual a 5,05 km/h. A velocidade máxima de caminhada é atingida para percursos com declive de aproximadamente -5%.

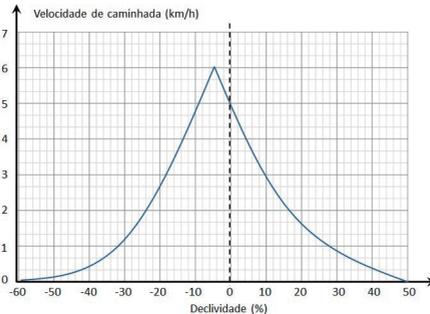


Figura 70. Função exponencial da velocidade caminhada de Tobler, de acordo com declividade do terreno.

Assim, o tempo para se percorrer um segmento, em cada um dos sentidos (acive e declive), será calculado aplicando a função de Tobler, armazenando-se os respectivos valores na tabela de atributos. Para isso, com a ferramenta "Add Field" adicione dois novos campos à tabela de atributos da classe de feições "arco_OD_3D", com os nomes de "tobler_hr_OD" (Figura 71) e "tobler_hr_DO" (Figura 72), selecionando a opção "Double" para o tipo de dados (Type).

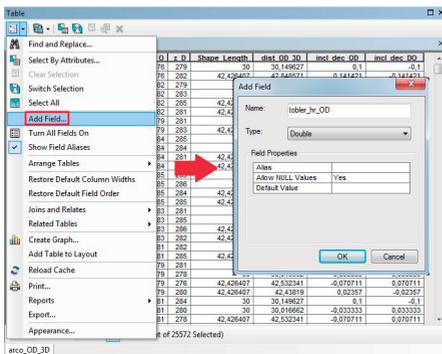


Figura 71. Criação de um novo campo/coluna ("tobler_hr_OD") por meio da interface da tabela de atributos.

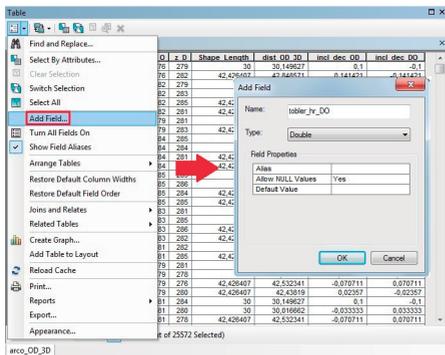


Figura 72. Criação de um novo campo/coluna (“*tobler_hr_DO*”), utilizando a funcionalidade disponível na interface para visualização de tabelas de atributos.

O próximo passo será abrir a calculadora de campo (“*Field Calculator*”) para calcular as velocidades de caminhada para cada sentido de um arco. Clique com o botão direito do mouse na coluna “*tobler_hr_OD*”; selecione “*Field Calculator*” e, na janela que se abre, insira a fórmula de Tobler da seguinte maneira, no painel inferior: “[*dist_OD_3D*] / (6000.0 * Exp (-3.5 * Abs ([incl_dec_OD] + 0.05)))” (Figura 73). O valor 6000 na expressão é para a conversão do resultado em metros/hora. A divisão do tamanho real do segmento pela velocidade de caminhada correspondente, ou seja, $(6000e^{-3,5|dh/dx+0,05|})$, é que fornecerá o tempo em horas para percorrer cada segmento.

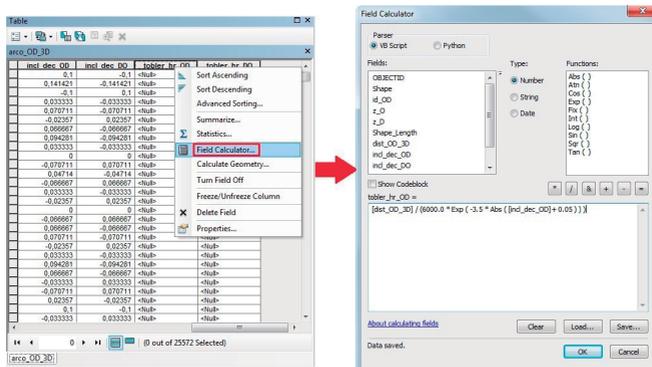


Figura 73. – Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Field Calculator...*” e expressão utilizada para calcular o tempo de caminhada entre destino e origem, aplicando-se a regra de Tobler.

Repita esse procedimento para o campo "tobler_hr_DO", modificando a respectiva inclinação "incl_dec_DO" na expressão (Figura 74). A Figura 75 mostra o resultado dessas operações.

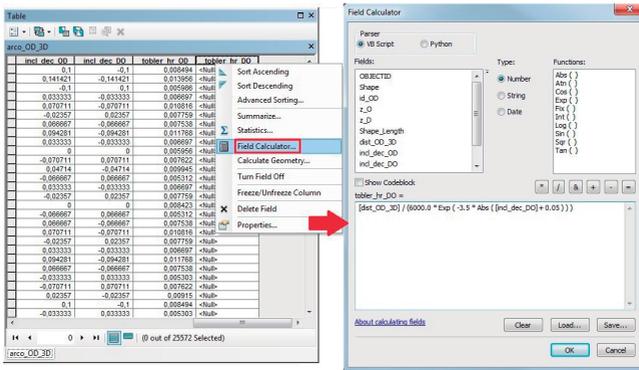


Figura 74. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta "Field Calculator..." e expressão utilizada para calcular o tempo de caminhada entre origem e destino, aplicando-se a função de Tobler.

Shape_Length	dist_OD_3D	incl_dec_OD	incl_dec_DO	tobler_hr_OD	tobler_hr_DO
30	30.149622	0.1	-0.1	0.008494	0.005066
42.426407	42.846571	0.141421	-0.141421	0.013956	0.008634
30	30.149622	0.1	-0.1	0.008494	0.005066
30	30.019862	0.033333	-0.033333	0.006667	0.005303
42.426407	42.532341	0.070711	-0.070711	0.011898	0.007622
42.426407	42.43819	-0.02357	0.02357	0.007759	0.00915
30	30.086593	0.066667	-0.066667	0.007538	0.005312
42.426407	42.614452	0.094281	-0.094281	0.011768	0.009203
30	30.019862	0.033333	-0.033333	0.006667	0.005303
30	30	0	0	0.008423	0.004243
42.426407	42.532341	-0.070711	0.070711	0.007622	0.010816
42.426407	42.473521	0.0474	-0.0474	0.009945	0.00715
30	30.086593	-0.066667	0.066667	0.005312	0.007638
30	30.019862	0.033333	-0.033333	0.006667	0.005303
42.426407	42.43819	-0.02357	0.02357	0.007759	0.00915
42.426407	42.426407	0	0	0.008423	0.004243
30	30.086593	0.066667	-0.066667	0.005312	0.007538
30	30.086593	0.066667	-0.066667	0.007538	0.005312
42.426407	42.43819	-0.02357	0.02357	0.007759	0.00915
30	30.019862	-0.033333	0.033333	0.005303	0.006667
42.426407	42.532341	-0.070711	0.070711	0.007622	0.010816
42.426407	42.43819	0.02357	-0.02357	0.00915	0.007759
30	30.149622	0.1	-0.1	0.008494	0.005066
30	30.019862	-0.033333	0.033333	0.005303	0.006667

Figura 75. Tabela de atributos da classe de feições "arco_OD_3D", com destaque para os tempos de caminhada, estimados para os percursos origem-destino e destino-origem, segundo a regra de Tobler.

Pode-se perceber, nas áreas com relevo mais íngreme, proporcionalmente um maior tempo para se percorrer os segmentos (Figura 76). Para converter o tempo de caminhada em minutos, basta multiplicar o valor de Tobler por 60. Por ser a área desse exemplo pouco descolosa, a amplitude de tempo mínimo e máximo para percorrer cada segmento não foi grande.

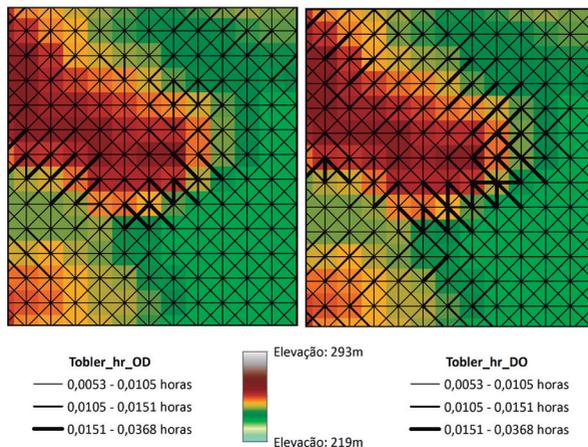


Figura 76. Amplitude de tempos de caminhada em função da inclinação do terreno.

Barreiras relativas e absolutas

A inclinação do terreno é o principal custo a ser considerado para otimização de um caminho ou traçado de acesso a determinado recurso. Entretanto, como o propósito da metodologia aqui apresentada é a aplicação em ambientes de florestas naturais, sabe-se que há muitos outros fatores determinantes que servem como impedância para o caminhamento ou traçado. Assim, sempre que possível, deve-se considerar esses obstáculos na metodologia, representando mais fielmente o ambiente florestal modelado.

Identificam-se dois tipos de barreiras: aquelas em que não se deve de forma alguma cruzá-las (ultrapassá-las), chamadas de barreiras absolutas, e aquelas em que se deve evitar cruzar por representarem um atraso no caminhamento, denominadas barreiras relativas. A identificação dessas barreiras pode ser registrada por meio de coleta de dados em campo, variando de acordo com os objetivos do trabalho e as percepções obtidas da área de estudo. Dentre essas barreiras, a mais importante, e que será considerada como exemplo nesse minucioso roteiro, é a rede hidrográfica dentro do local de estudo. A hidrografia é importante na definição do traçado; qualquer local de estudo é

cortado por rios e igarapés, os quais representam resistências físicas ao traçado das trilhas. Desta forma, pode-se restringir a transposição de corpos d'água, ou apenas incluir suas superfícies como um fator de impedância, podendo ser cruzadas quando não houver outra alternativa ou, ainda, locomover-se pela hidrografia utilizando um barco.

Para exemplificar, será utilizada a rede hidrográfica raster modelada no início deste estudo, depois de ser ordenada pelo método de Shreve. O primeiro passo será a vetorização dessa feição. Para tal, utiliza-se a ferramenta *"Raster to Polyline"* disponível em *"Conversion Tools > From Raster > Raster to Polyline"* (Figura 77). Na janela aberta, em *"Input Raster"*, adicione a hidrografia raster e selecione o local para salvar, atribuindo-lhe o nome *"hidro_shreve_v"*, i.e., hidrografia ordenada pelo método Shreve, no formato vetorial. Em seguida, em *"Background value (optional)"* selecione *"NODATA"*, ou seja, todas as demais células desse grid estão assinaladas com *"NODATA"*. Por último, desmarque a opção *"Simplify Polylines"*, para seguir exatamente o traçado centro a centro das células. Ao final do processamento será gerada uma nova classe de feições vetoriais do tipo linha.

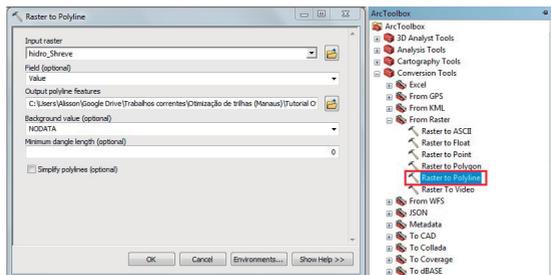


Figura 77. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta *"Raster to Polyline"* e as configurações definidas.

Novamente, pode-se apagar os campos desnecessários da tabela de atributos. Com a ferramenta *"Delete Field"*, delete os campos *"arcid"*, *"from_node"* e *"to_node"* (Figura 78).

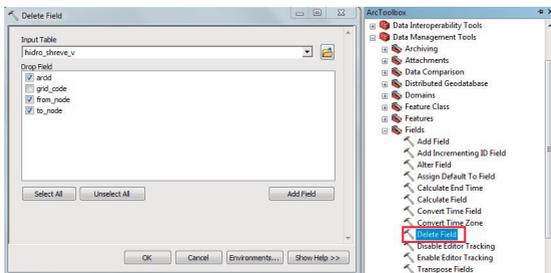


Figura 78. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “Delete Field” e as configurações definidas.

Para melhor organização da informação, deve-se renomear a coluna “grid_code” para “shreve”, pois essa coluna contém a informação do ordenamento obtida a partir do raster. Para isso acesse a ferramenta “Alter Field” disponível em “Data Management Tools > Fields > Alter Field” (Figura 79). Na janela aberta selecione a classe de feições “hidro_shreve_v” na lista “Input Table”; em “Field Name”, marque o campo “grid_code” para ser renomeado e, logo abaixo, digite o novo nome, “shreve”.

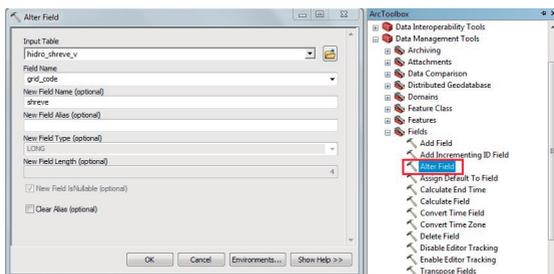


Figura 79. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “Alter Field” e as configurações definidas.

O próximo passo será identificar os segmentos interceptados pelos arcos da hidrografia, que representarão regiões com impedâncias bastante distintas daquelas atribuídas ao relevo. Para assegurar a seleção de todos os arcos interceptados pela rede hidrográfica, será gerada uma faixa com largura igual a 1/10 do lado de uma célula, ou seja, 3 m, de cada lado da rede hidrográfica. Os polígonos resultantes

serão armazenados em uma nova classe de feições denominada “*hidro_larg*”. Isso será feito mediante o uso da ferramenta “*Buffer*”, disponível em “*Analysis Tools > Proximity > Buffer*” (Figura 80). Na janela aberta: (1) na lista “*Input Features*” selecione a camada “*hidro_shreve_v*”; em “*Output Feature Class*” selecione o local para salvar a classe de feições resultante e atribua-lhe o nome “*hidro_larg*”; em “*Distance [value or field]*” clique no campo logo abaixo da opção “*Linear unit*” e digite o valor 3; em “*Dissolve Type (optional)*” selecione “*ALL*”, o que significa dissolver todos os buffers gerados ao longo de cada arco da hidrografia, resultando uma única feição do tipo polígono (2). Para todas as demais opções da ferramenta “*Buffer*”, mantenha os valores originalmente assinalados.

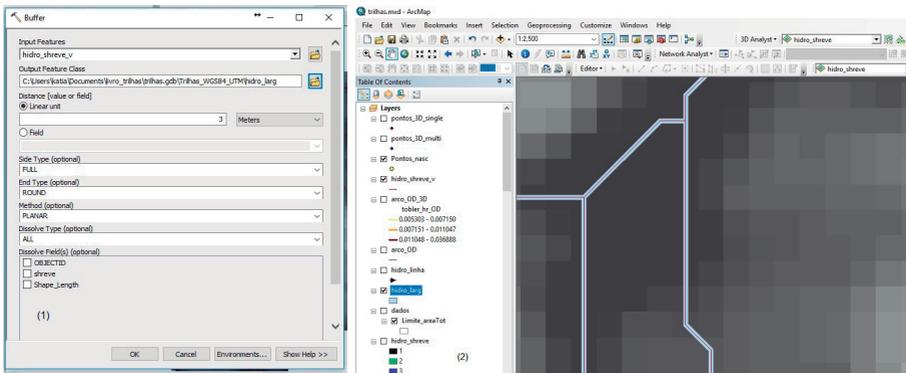


Figura 80. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*Buffer*”, com as configurações definidas (1), e a classe de feição resultante (2).

É oportuno relembrar que os arcos da hidrografia vetorial “*arco_OD_3D*” passam exatamente sobre o centro das respectivas células da versão raster da malha hidrográfica, conforme ilustrado na Figura 81. Uma vez que as células da hidrografia têm o mesmo tamanho que as do MDE e que esses dois grids se alinham perfeitamente, os arcos selecionados representam regiões do relevo ocupadas por água.

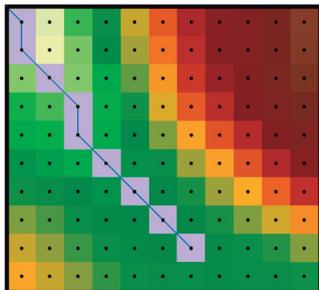


Figura 81. Sobreposição dos arcos da hidrografia vetorial com os pontos associados aos centros das células e alinhamento dos grids hidrografia raster e MDE.

Na sequência serão selecionados os arcos ou segmentos que interceptam a rede hidrográfica, visando definir de que forma essa barreira será representada na simulação do traçado das trilhas. No menu principal do ArcMap, localizado na parte superior da sua janela, clique em “*Selection*” e escolha a opção “*Select By Location...*” (Figura 82). Na janela que se abre, clique em “*Selection method*” e selecione a opção “*select features from*”. A seguir, marque a camada “*arco_OD_3D*” no painel “*Target layer(s)*”; clique na lista “*Source layer*” e selecione a camada “*hidro_larg*”. Certifique-se de que a opção “*intersect the source layer feature*” esteja selecionada para o campo “*Spatial selection method for target layer feature(s):*”. Por fim, clique no botão *OK* para executar a seleção espacial.

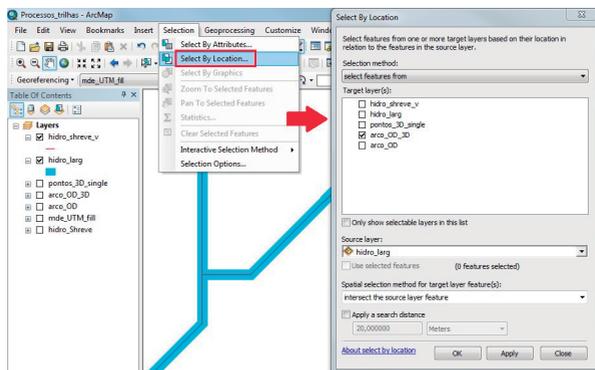


Figura 82. Caminho de acesso, destacando-se a ferramenta “*Select By Location...*” e as respectivas configurações definidas.

Com esse comando serão selecionadas todas as feições da camada "arco_OD_3D" que intersectam o polígono de "hidro_larg" (Figura 83).

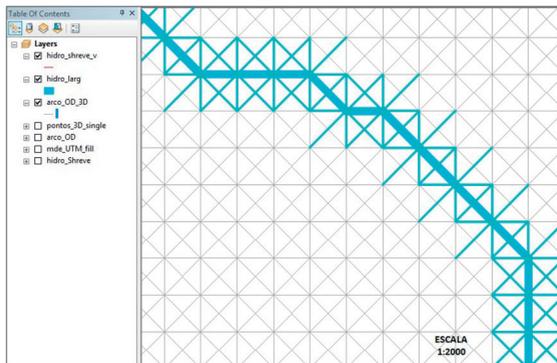


Figura 83. Arcos da classe de feições "arco_OD_3D" que intersectam a rede hidrográfica.

Aqui é assumido que percorrer uma célula da hidrografia leva o dobro do tempo de percorrer uma célula do terreno. Essa informação deverá ser atualizada somente para os arcos selecionados. Assim, abra a tabela de atributos da camada "arco_OD_3D". Em seguida, posicione o cursor sobre o nome da coluna "tobler_hr_OD", clique com o botão direito do mouse e abra a calculadora de campo ("Field Calculator"). No painel inferior, crie a expressão "[tobler_hr_OD] * 2" (Figura 84). Repita esse processo para atualizar os valores do campo "tobler_hr_DO", que representarão o tempo de percurso no sentido inverso, i.e., destino-origem (Figura 85).

Note que, para esse exemplo, a hidrografia foi considerada como uma barreira relativa, havendo um custo maior (o dobro do tempo) para se cruzá-la. Para estabelecer uma barreira absoluta, bastará impor um custo extremamente elevado, fazendo com que o traçado não passe por esses trechos ou, ainda, simplesmente editar e deletar as feições que representam barreiras absolutas.

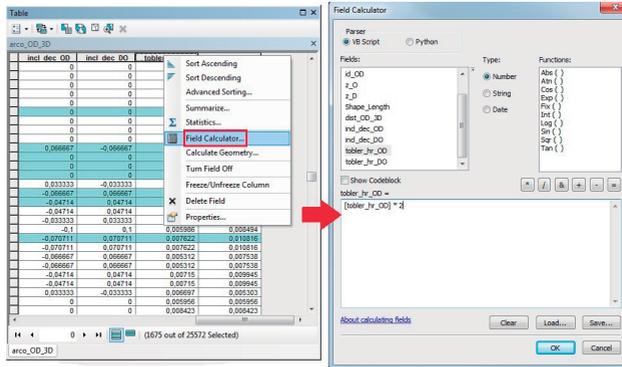


Figura 84. Caminho de acesso, destacando-se a ferramenta “Field Calculator...” e a redefinição do tempo gasto para percorrer os segmentos interceptados pela hidrografia no sentido origem-destino.

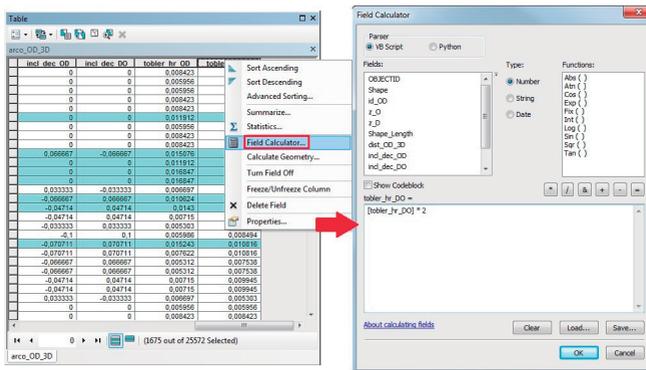


Figura 85. Caminho de acesso, destacando-se a ferramenta “Field Calculator...” e a redefinição do tempo gasto para o percurso dos segmentos interceptados pela hidrografia no sentido destino-origem.

Esse é apenas um exemplo da abordagem que poderá ser empregada para se estabelecer impedâncias (custos) diferenciados, de acordo com as características do terreno. Para tornar o exemplo mais próximo da realidade, pode-se simular a largura dos rios a partir da ordem de cada segmento, pressupondo que quanto maior for o número de afluentes de um dado segmento da rede hidrográfica maior será sua largura. Além do mais, para rios navegáveis, pode-se assinalar uma velocidade maior

ao considerar o tráfego fluvial, devendo-se, porém, adicionar o tempo gasto na transição de modais, i.e., para se colocar e retirar a carga do barco. Há, ainda, um problema adicional a ser resolvido quando se lida com transportes multimodais: a localização e o número ideais de pontos de transbordo (atracadouros). Como se pode depreender, existem infinitas possibilidades para se modelar apropriadamente um problema de transporte, em que a abordagem correta dependerá dos dados disponíveis para a área de estudo e, sobretudo, do grau de familiaridade do pesquisador com essa classe de problemas e com os recursos avançados de modelagem espacial em ambiente SIG.

Ferramentas de análise de redes

No contexto da programação matemática, o termo modelo de redes é usado para definir uma classe ampla de técnicas úteis para resolver uma grande quantidade de problemas que lidam com a geometria de posição, podendo essa posição ser tanto física quanto temporal. Algoritmos para a resolução de problemas com estrutura de rede antecedem o surgimento da programação linear em cerca de 200 anos. Os modelos de redes podem todos ser caracterizados como tipos especiais de problemas de programação linear. Esses modelos são, contudo, resolvidos mais eficientemente utilizando-se algoritmos especialmente desenvolvidos para situações específicas, que se beneficiam das suas estruturas geométricas mais simples. Há um conjunto de características comuns a todos os modelos de redes, que permitem que eles sejam formulados e analisados simbolicamente, sem que se tenha, sequer, que representar fielmente as localizações absolutas das origens e destinos ou mesmo o traçado real das rotas conectando tais pontos (RIBEIRO, 2016). A modelagem em redes adota uma estrutura de representação especial extremamente versátil e funcional, denominada grafo. A seguir, apresentam-se as definições clássicas das estruturas elementares utilizadas na modelagem de redes.

Terminologia

- **Grafo:** consiste de uma série de junções, denominadas nós, que estão conectadas por arcos. No contexto da programação matemática, arcos desempenham o papel de variáveis de decisão.
- **Rede:** é um grafo para o qual existe alguma quantidade (distância, custo, tempo, relação de hereditariedade, taxa ou capacidade de fluxo etc...) associada a cada um de seus arcos.
- **Cadeia:** é uma sequência de arcos conectando nós. Quando se especifica a direção do percurso (ou do fluxo) ao longo da cadeia, essa cadeia é então referida como caminho ou rota.
- **Ciclo:** é uma cadeia conectando uma rota a ela mesma, ou seja, os nós inicial e final são os mesmos.
- **Grafo conectado:** é um grafo no qual há uma cadeia conectando cada par de nós.
- **Árvore:** é um grafo conectado, ou rede, sem a ocorrência de ciclos.
- **Arco orientado (ou direcionado):** é aquele para o qual existe um senso de direção associado, de tal forma que um nó é considerado a origem do arco e o outro, o destino. Assim, pode existir dois arcos orientados unindo um único par de nós: um no sentido oposto do outro.
- **Grafo orientado ou rede direcionada:** é um grafo no qual todos os seus arcos são orientados.

A tecnologia SIG oferece uma solução prática para o problema de rotas otimizadas, apresentando vantagens significativas e muito interessantes. Neste contexto, destaca-se o *software ArcGIS* com suas extensões, em especial a "*Network Analyst*".

A extensão "*Network Analyst*" fornece um amplo leque de recursos para análise espacial, baseados em estruturas vetoriais de rede, voltadas à modelagem e resolução de problemas clássicos de roteamento, como, por exemplo, instalações mais próximas,

identificação da melhor rota, otimização e alocação de recursos, instruções pormenorizadas de percursos em áreas urbanas, áreas de influências e de atendimento, matriz de custo origem-destino (ANTUNES, 2008; ESRI, 2016). Dentre as várias possibilidades de aplicação do *Network Analyst*, maior ênfase será dada a exemplos de uso das ferramentas para a resolução de rotas entre origem-destino e o problema clássico do Caixeiro Viajante, para obtenção de trilhas otimizadas, tendo em vista a proposta de aplicação dessa metodologia na exploração de recursos florestais naturais.

Vale destacar que o algoritmo *Dijkstra* é a base da implementação das ferramentas disponíveis no "*Network Analyst*" para solução de problemas em análise de rede (ESRI, 2016). O algoritmo funciona com custos associados aos arcos ou arestas, envolvendo problemas de localização em redes com origens e destinos (FERNANDES, 2013). As arestas ou arcos representam a ligação entre dois pontos de interesse, que são os nós da rede.

Como exemplo prático, deseja-se ir do ponto "1" para o ponto "5" pelo melhor caminho, considerando os valores como custos para os caminhos, que também podem ser interpretados como o desejo de ir de uma cidade a outra. Nesse algoritmo é escolhido um vértice como raiz (origem) da busca e, a partir dele, calcula-se o custo mínimo desse vértice para todos os demais vértices, até a quantificação de todos os custos dos possíveis caminhos, chegando a uma solução ótima com a sequência "1-3-6-5" (Figura 86).

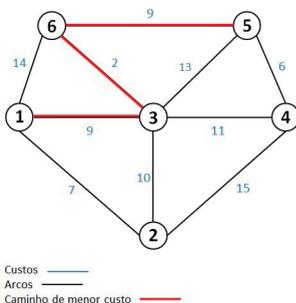


Figura 86. Exemplo hipotético de uma rede de estradas com as respectivas distâncias, conectando 6 cidades, e apresentação da rota de menor custo partindo do ponto 1 e chegando ao 5.

Criação de uma rede

Para o uso dos recursos disponíveis na extensão “*Network Analyst*”, é necessário criar uma classe de feições especial, denominada de conjunto de dados em rede. A criação dessa estrutura somente poderá ser feita a partir de uma ou mais classes de feições armazenadas necessariamente em um conjunto de classes de feições, i.e., não se pode criar uma rede a partir de uma classe de feições armazenada na raiz de uma Geobase.

Na barra de ferramentas padrão do ArcMap, clique no ícone *Catalog*. Na janela Catalog, expanda a visualização da árvore de estruturas da Geobase “Trilhas”; em seguida, expanda o conjunto de classes de feições “Trilhas_WGS84_UTM”. Clique com o botão direito do mouse sobre o nome desse conjunto de classes de feições e selecione “New > Network Dataset...” (Figura 87).

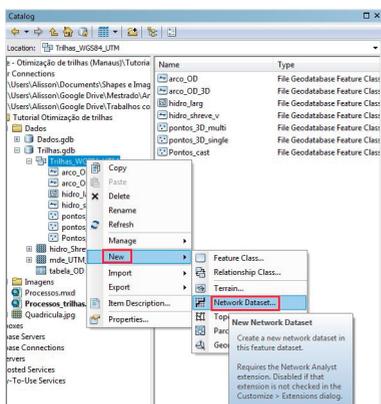


Figura 87. Caminho de acesso e destaque para a criação de um novo conjunto de dados em rede (“*Network Dataset...*”) dentro de um conjunto de classes de feições.

Uma nova janela é aberta, para criação da rede propriamente dita, conforme apresentado a seguir:

- Em “*Enter a name for your network dataset*” digite um nome para a rede que, neste caso, será “*Trilhas_rede*”. A opção logo abaixo permite definir em qual versão da extensão “*Network Analyst*” se deseja criar a rede, por questões de incompatibilidade entre versões distintas. Neste estudo será mantida a versão mais recente, que é a 10.1 (Figura 88). Depois, clique em “Avançar >”.

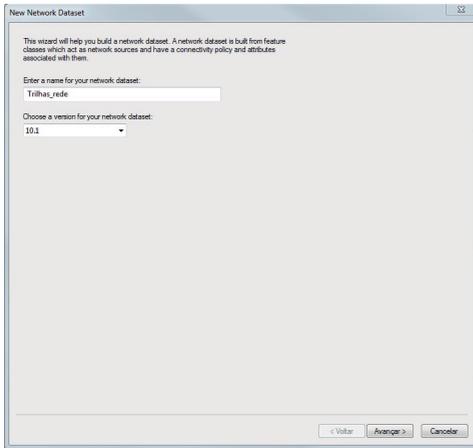


Figura 88. Atribuição do nome e versão do formato para o novo conjunto de rede.

- b) Deve-se seleccionar a(s) classe(s) de feições que fará(ão) parte da rede. Neste caso será marcada apenas a classe de feições “*arco_OD_3D*” (Figura 89). Em seguida clique em “*Avançar >*”.

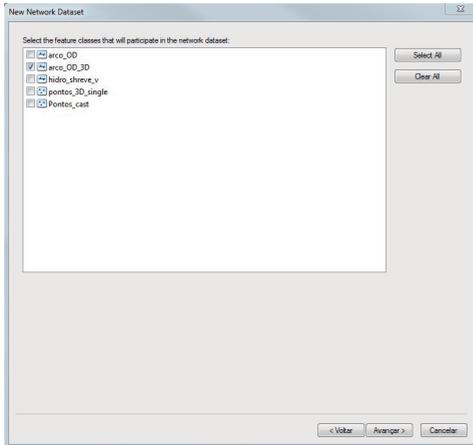


Figura 89. Seleção da classe de feições utilizada para se criar uma rede.

- c) A configuração que aparece a seguir é genérica, possibilitando contemplar variados níveis de complexidade, como, por exemplo, problemas de logística de transporte. Selecione a opção “*No*” e clique em “*Avançar >*”.

- d) Essa opção serve para a configuração quando se tem diferentes opções de conectividade entre os arcos da rede, o que não é o presente caso. Portanto, apenas clique em “Avançar >”.
- e) Essa etapa serve para configurar conexões ou cruzamentos de arcos com alturas diferentes, as coordenadas Z (altitude). É utilizada quando se trabalha com dados contendo viadutos, pontes, estações de mudança de modal de transporte etc. Neste exemplo, como a base do cálculo para o caminho ótimo será o tempo de caminhada em cada arco, cujos valores já se encontram na respectiva tabela de atributos, selecione a opção “None” e clique em “Avançar >”.
- f) Essa etapa é a mais importante. A partir dela poderão ser atribuídos inúmeros custos para os arcos da rede. Por padrão, o custo interpretado pelo software é o comprimento (“Length”) do segmento vetorial, que já está adicionado como custo (Figura 90). Na sequência adiciona-se o custo calculado relativo ao tempo de caminhada, que foi obtido a partir da velocidade de *Tobler*. Para isso, clique na opção “Add...” e configure a janela aberta da seguinte forma: em “Name”, atribua o nome “Tempo_tobler”; em “Usage Type” selecione “Cost”, ou seja, será entendido como um custo; em “Units” selecione “Hours”, ou seja, unidade em horas; em “Data Type” selecione “Double”, implicando maior precisão. Depois clique em OK. Um novo campo é adicionado à lista de atributos da rede.

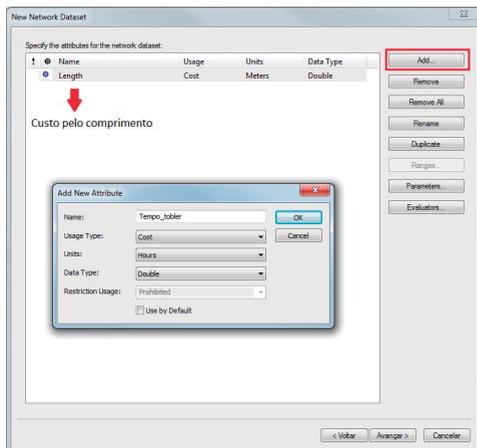


Figura 90. Adição de um novo atributo de custo (“Tempo_tobler”) à rede.

Note que aparecerá um sinal de exclamação (!) à esquerda da linha do novo atributo, indicando que ainda é necessário configurá-lo. Para isso, clique duas vezes sobre o nome do atributo criado. Uma nova janela é aberta, devendo-se selecionar em "Type", a opção "Field" para ambas as opções (Figura 91). Aparecem duas opções de "arco_OD_3D" disponíveis, uma para percorrer o arco no sentido origem-destino e outra para destino-origem. No campo "Value" selecione para "From-To" o valor respectivo que foi calculado na tabela de atributo, "tobler_hr_OD". Em seguida para o sentido inverso, i.e., "To-From", selecione "tobler_hr_DO".

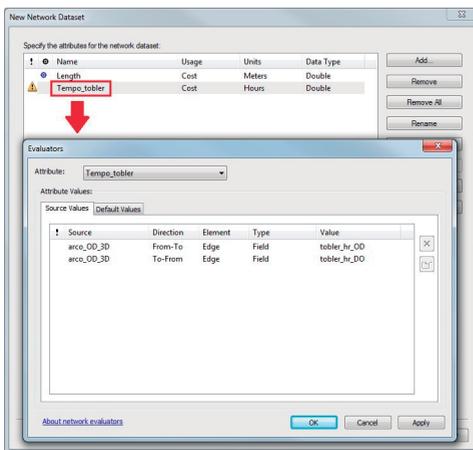


Figura 91. Configuração dos valores dos campos para o custo pela velocidade de *Tobler*.

Também pode ser criado um novo custo, visando enriquecer o processo, a partir do cálculo do caminho otimizado, considerando-se também a distância real calculada. Para isso, adicione um novo custo com o nome "Dist_3D" com as opções "Cost", "Meters" e "Double" selecionados, Figuras 92 e 93. Feito isso, clique duas vezes sobre o novo custo criado e selecione novamente a opção "Field" para o campo "Type" e "dist_OD_3D" para "Value"; clique em *OK*.

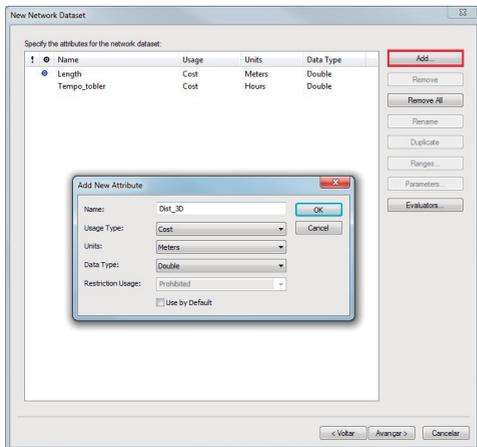


Figura 92. Adição de um novo atributo (“Dist_3D”) como custo adicional.

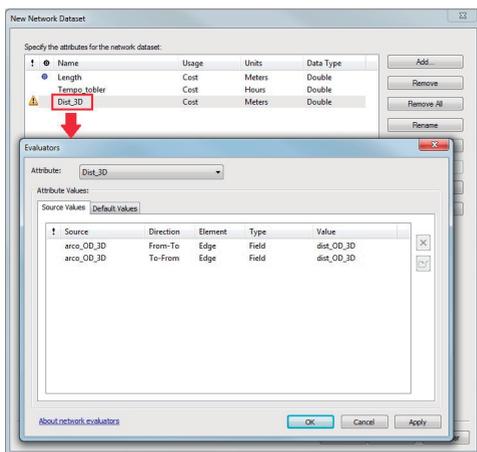


Figura 93. Configuração dos valores dos campos para o custo pela distância tridimensional.

- g) A próxima janela é usada para configurar os sistemas multimodais, como, por exemplo, carro, caminhão, navio, ou um produtor que faça uma parte do percurso a pé e outra usando uma canoa. Para este nosso estudo de caso, deixe em branco e clique em “Avançar >”.
- h) A próxima janela possibilita configurar as instruções detalhadas para cada mudança de trecho do percurso (mudança de ruas,

entroncamentos de rodovias, cruzamentos com semáforos etc). Clique em “*Directions...*” e, na janela seguinte, selecione “*id_OD*” para “*Name*” e clique OK, e “*Avançar*” (Figura 94).

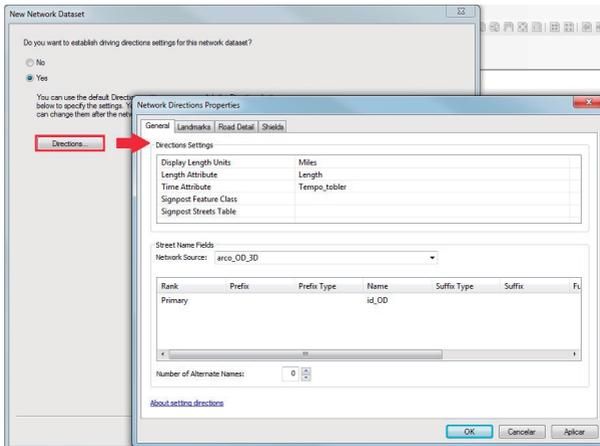


Figura 94. Configuração da informação de direção.

- i) Na janela seguinte, selecione a opção “*Build Service Area Index*” e clique em “*Avançar*”. Esse procedimento reduz o tempo de processamento e melhora a qualidade (refinamento) das feições resultantes.

Por último será exibido um resumo das opções e configurações da nova rede a ser criada; clique então em “*Finish*” para criar a rede. Como dito anteriormente, a extensão “*Network Analyst*” trabalha somente com dados vetoriais. A rede construída possuirá várias classes de feições, do tipo linha, junções e pontos nas interseções (Figura 95). A partir dessas estruturas derivadas dos dados originais já é possível identificar, por exemplo, a melhor rota, com base no algoritmo de *Dijkstra*. Vale ressaltar que, ao final do processo de criação de uma rede, é automaticamente gerada uma classe de feições do tipo pontos (junctions), associada aos nós extremos dos arcos e às interseções.

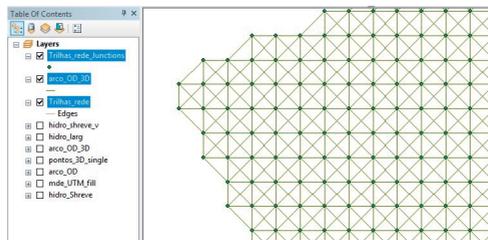


Figura 95. Conjunto de dados em rede criado a partir da classe de feições original “arco_OD_3D” e as respectivas classes de feições derivadas, “Trilhas_rede” (arestas, i.e., arcos) e “Trilhas_rede_Junctions” (junções, i.e., interseções).

Otimização de rotas

A construção de rotas otimizadas se dá a partir da ferramenta “New Route”, disponível na caixa de ferramentas *Network Analyst* da *ArcToolbox*. Para acessá-la, deve-se primeiramente, habilitar a extensão “*Network Analyst*”, acessando o menu “*Customize > Extensions*”. Na janela que se abre, ative a opção “*Network Analyst*” (Figura 96). Em seguida ancore essa extensão na parte superior da janela do ArcMap, junto às demais já habilitadas.

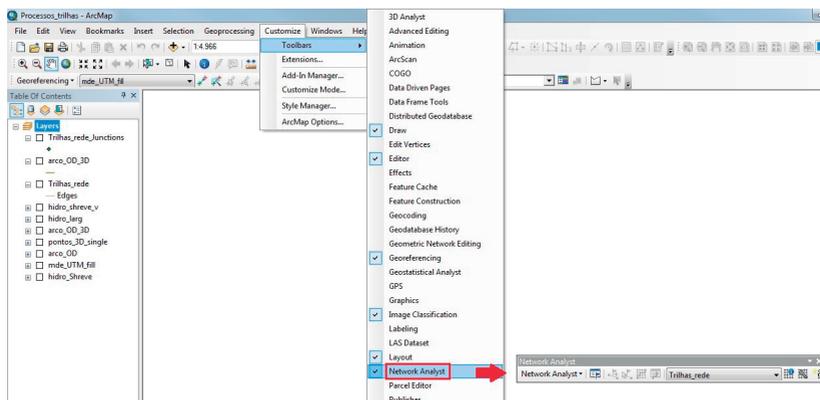


Figura 96. Caminho de acesso e destaque para a habilitação da extensão “*Network Analyst*”.

Criação de uma nova rota

Na barra de ferramentas “*Network Analyst*”, abra a lista “*Network Analyst*” e selecione a opção “*New Route*” (Figura 97). Ao clicar nessa opção, aparece em “*Table of Contents*” um novo grupo de camadas (*Layers*), ainda sem quaisquer classes de feições associadas a elas, porém contendo a simbologia apropriada. As informações necessárias para a construção da rota serão inseridas posteriormente.

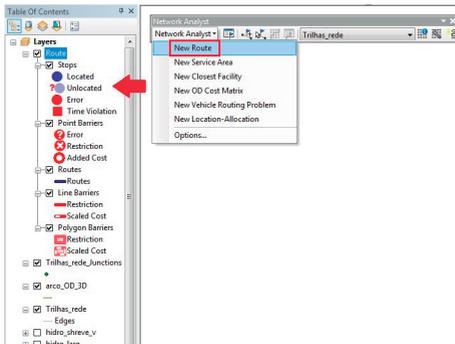


Figura 97. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*New Route*” para criar se uma nova rota.

Em seguida devem ser indicadas as localizações de parada ou “*Stops*”. Na janela de conteúdos do “*Network Analyst*” (Figura 98), posicione o cursor sobre o nome da camada “*Stops*” e clique com o botão esquerdo do mouse, ativando-a (Figura 98A). Agora, na barra de ferramentas “*Network Analyst*”, clique na opção “*Create Network Location Tool*” (Figura 98B), que possibilita a adição manual (interativa) de pontos. Há duas opções na barra de ferramentas: uma para inserção dos pontos ao longo dos arcos da rede, e outra para localização dos pontos exatamente sobre junções. É oportuno ressaltar que, ainda que a visualização das feições (arcos e junções) de uma rede esteja desabilitada, qualquer ponto adicionado será movido para a junção ou para o arco mais próximo, observada a tolerância vigente. Depois de ativada a ferramenta, como exemplo, crie dois pontos quaisquer dentro da área de estudo. Para tanto, posicione o cursor sobre o local escolhido como origem da rota (Figura 98C), dentro do painel de visualização das camadas (data frame), e pressione o botão esquerdo do mouse. Um círculo com a cor ciano será adicionado no local clicado

e, na janela de conteúdos do *Network Analyst*, será adicionado um ponto de parada, identificado com o rótulo “*Graphic Pick 10*”, que neste exemplo aparece como o de número 10, porque foram feitos dez testes na área de trabalho; a numeração é sequencial. Em seguida desloque o cursor para o ponto escolhido como destino e clique novamente com o botão esquerdo do mouse (Figura 98D). Outro círculo ciano será adicionado no local clicado e, na janela de conteúdos do *Network Analyst*, será adicionado um novo ponto de parada, identificado como “*Graphic Pick 11*”.

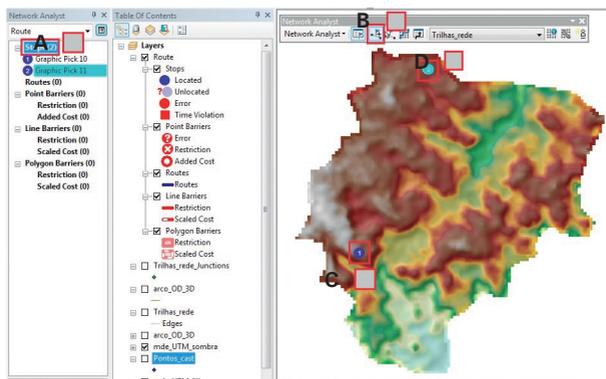


Figura 98. Processo para inclusão manual dos pontos de origem e destino da rota, no painel de visualização das camadas.

Antes de resolver o problema de se identificar a rota otimizada, é necessário configurar qual atributo será tomado como referência para os custos de se percorrermos os arcos da rede. Para isso, clique na opção “*Route Properties*”, localizada no canto superior direito da janela de conteúdos do “*Network Analyst*”, (Figura 99A). Na janela “*Layer Properties*”, vá até a aba “*Analysis Settings*”, clique na lista “*Impedance*” e então selecione o atributo “*Tempo_tobler (Hours)*”. Dessa forma, será encontrada a rota com o menor tempo de caminhada para ir do ponto 1 ao ponto 2. No painel inferior direito (*Directions*) dessa mesma janela, selecione “*Meters*” para “*Distance Units*”, marcando também a opção “*Use Time Attribute*” e selecionando o mesmo atributo adotado para a impedância, ou seja,

“*Tempo_tobler (Hours)*” (Figura 99B). A configuração das opções do painel “*Directions*” somente fará sentido se o o objetivo é detalhar a sequência de trechos que compõem a rota otimizada. Clique em *OK* para efetivar as alterações e fechar a janela.

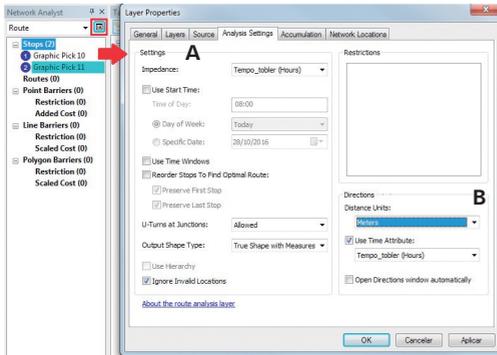


Figura 99. A) Acesso à janela de configuração das propriedades da rota; e B) Seleção do atributo usado como impedância no cálculo da rota otimizada.

Terminada a configuração do problema de rede, clique na opção “*Solve*” da barra de ferramentas “*Network Analyst*” (Figura 100) para resolvê-lo e, assim, encontrar a rota ótima, que será então apresentada na moldura de dados do ArcMap.



Figura 100. Aba de ferramentas do “*Network Analyst*” com destaque para opção de solução do problema (“*Solve*”).

A rota otimizada, considerando-se o tempo de caminhada de *Tobler*, ligará os dois pontos respeitando primordialmente a declividade do terreno. Se não se especificar outro atributo, por “*default*” a rota é calculada baseada apenas no comprimento de cada arco, resultando no trajeto mais curto. Na Figura 101 apresentam-se duas rotas otimizadas: A) adotando o comprimento dos arcos como impedância; e B) adotando o tempo de caminhada de *Tobler*. Ao se comparar as duas opções observa-se que a rota pelo tempo de caminhada de *Tobler* respeita, sempre que possível, o relevo, evitando o cruzamento em relevos acidentados e a rede hidrográfica.

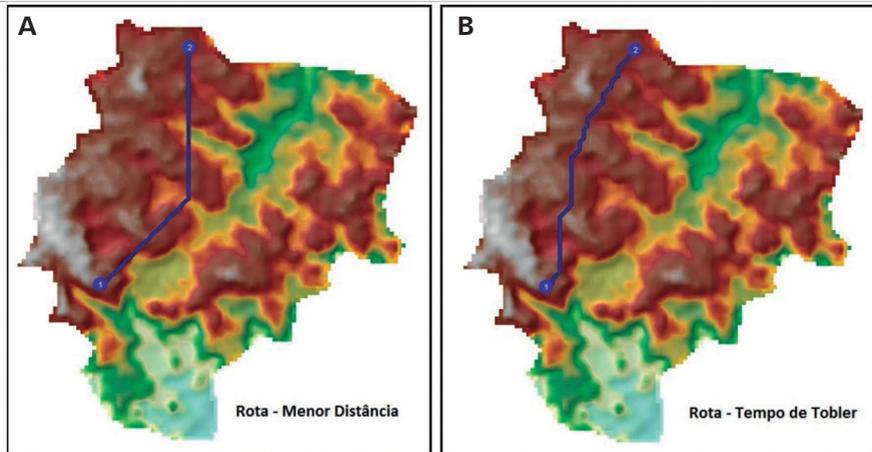


Figura 101. Comparação das rotas conectando dois pontos definidos manualmente, adotando-se como custo: A) Comprimento dos arcos; e B) Tempo de caminhada de *Tobler*.

Analisando-se a rota A, era de se esperar que o percurso de menor distância fosse uma linha reta unindo os dois pontos. Entretanto, para que isso ocorresse, deveria haver, necessariamente, um arco reto conectando diretamente esses dois pontos. Tal situação somente acontecerá se a linha conectando os dois pontos formar um ângulo múltiplo de 45° com a horizontal. Qualquer rota de uma rede somente poderá ser criada passando pelos arcos que constituem a rede. Portanto, no presente exemplo, o trajeto do ponto 1 ao ponto 2 terá que ser efetuado ponto a ponto, passando pelos respectivos arcos que os conectam, conforme ilustrado na Figura 102. Vale destacar que esse resultado é perfeitamente coerente com o que seria obtido no ambiente raster (usando o comando *Cost Path* da extensão *Spatial Analyst*), em que o percurso é composto por uma sequência de células da superfície de custos.

Quanto à rota B (Figura 101), que está associada à minimização do tempo de caminhada, conforme preconizado por *Tobler*, seu traçado respeita sempre que possível a declividade do terreno, evitando regiões de encostas íngremes. Ao adotar o tempo de *Tobler* como fator de impedância, obtém-se um trajeto geralmente mais plano.

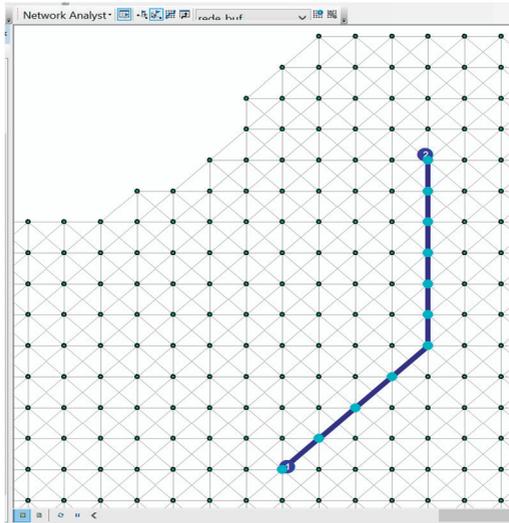


Figura 102. Sequência de pontos ao longo da rota de menor distância conectando os pontos 1 e 2.

No presente estudo de caso, foram escolhidos aleatoriamente os pontos inicial e final da rota; entretanto, é possível também adicionar pontos já coletados e armazenados em uma classe de feições contendo, por exemplo, a localização geográfica de árvores de interesse. Para isso, na janela de conteúdos do *“Network Analyst”* clique com o botão direito do mouse sobre *“Stops”* e selecione *“Load Locations...”* (Figura 103). Na janela aberta, em *“Load From”* selecione a camada de interesse (*Pontos_cast_selecionados*) e pressione *OK*.

Em seguida, na barra de ferramentas do *“Network Analyst”*, pressione a opção *“Solve”* para determinar a melhor rota ligando todos os pontos na ordem exata em que eles se encontram na classe de feições. É possível ainda, em *“Layer Properties > Analysis Settings”* (Figura 101A), selecionar a opção *“Reorder Stops to Find Optimal Route”*, escolhendo-se manter: i) somente a primeira parada; ii) somente a última parada; ou iii) ambas. A opção de se reordenar a sequência de visitas, via de regra, reduz consideravelmente o custo da rota resultante (Figura 104).

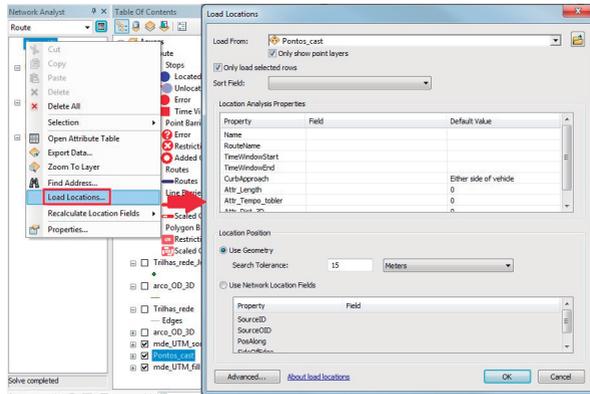


Figura 103. Processo para inclusão de pontos já coletados e armazenados em uma feição vetorial.

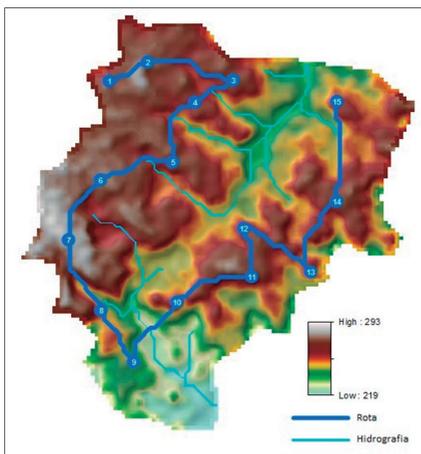


Figura 104. Rota otimizada com base no tempo de caminhada de *Tobler*, para acessar todas as árvores de interesse dentro da área de estudo.

Na janela de conteúdos do “*Network Analyst*”, ao clicar com o botão direito do mouse sobre “*Routes*” e, em seguida, em “*Directions*”, abre-se uma nova janela (“*Directions (Route)*”), listando todas as instruções acerca do percurso, mostrando, ainda, a distância e o tempo total da rota (Figura 105).

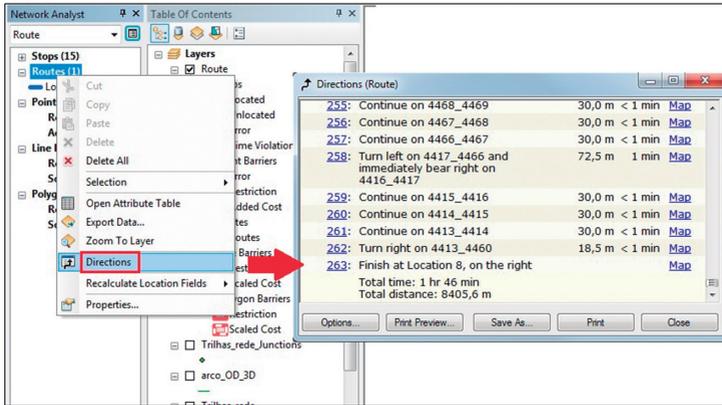


Figura 105. Acesso às instruções sobre o trajeto, com o tempo total e distância percorrida.

Problema do Caixeiro Viajante

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) ou "*Traveling-salesman problem*" (TSP) é um dos problemas clássicos de transporte, que pode ser definido, basicamente, por uma lista de cidades com distâncias conhecidas entre elas, sendo o objetivo encontrar o menor caminho possível para se percorrer e visitar todas as cidades, apenas uma vez, e, ao final, retornar ao ponto inicial, ou seja, à cidade de origem (APPLEGATE et al., 2006; HOFFMANN et al., 2006; ZIVIANI, 2015).

Essa é uma abordagem que pode ser implementada para a construção de trilhas otimizadas com base no tempo de caminhada de *Tobler*. O custo de *Tobler* (tempo de *Tobler*) poderá ser então utilizado para determinar o melhor acesso às árvores de interesse de uma população, ou, ainda, pontos intermediários estratégicos (armazéns ou pátios de baldeio) para concentrar temporariamente a produção. Por exemplo, com o uso da ferramenta "*New Location-Allocation*", disponível na lista "*Network Analyst*", é possível definir a quantidade desejada de pontos estratégicos para acesso a determinada quantidade de árvores ou setor da área. Pode-se ainda fazer a subdivisão da área de acordo com bacias hidrográficas, utilizando-se os recursos disponíveis na caixa de ferramentas "*Hidrology*" da extensão "*Spatial Analyst*".

Nesse exemplo, visando à construção da rota otimizada via PCV, será utilizada como ponto de destino a localização geográfica de árvores da castanheira (*Bertholettia excelsa* Bonpl.), identificadas no inventário florestal como as mais produtivas, sendo, portanto, maior o interesse na exploração dos frutos destas. Acesse a barra de ferramentas “Network Analyst” e escolha “New Vehicle Routing Problem” (Figura 106). Quando o objetivo é obter a solução para o PCV com base no tempo de caminhada de *Tobler*, essa é a melhor opção para se modelar o problema de roteamento.

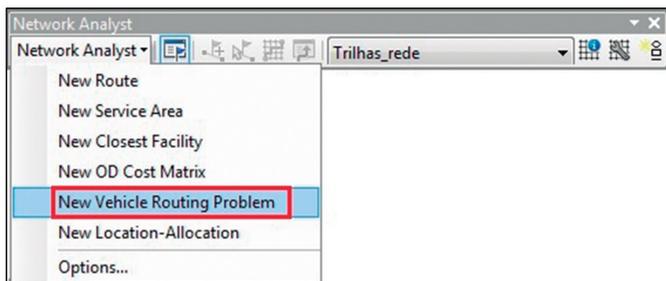


Figura 106. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “New Vehicle Routing Problem” para solução via Problema do Caixeiro Viajante-PCV.

A seguir será definido o ponto de origem e final da rota. Nesse exemplo, escolheu-se arbitrariamente a primeira árvore da tabela de atributos da classe de feições “Pontos_cast” (Figura 107).

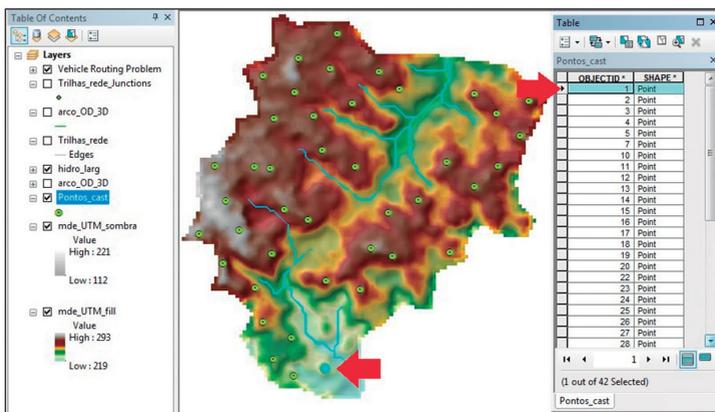


Figura 107. Destaque para a seleção de um ponto de localização de uma árvore para início e final da rota.

Após selecionada a árvore, esta deve ser inserida pela opção “Depots” na janela de conteúdos do “*Network Analyst*”, clicando-se com o botão direito do mouse em “*Depots*” e, em seguida, na opção “*Load Location*”. No campo “*Load From*” da janela “*Load Locations*”, selecione a camada de interesse e certifique-se de que a opção “*Only load selected rows*” esteja selecionada, garantindo, assim, que somente o ponto selecionado será adicionado; mantenha em “*Location Position* > “*Use Geometry*” > “*Search Tolerance*” igual a 15 (Figura 108A). Feito isso, serão adicionados os pontos restantes de localização das árvores como os de paradas intermediárias. Assim, na tabela de atributos da classe de feições contendo a localização de todas as árvores, selecione a opção “*Switch Selection*” para inverter a seleção vigente (Figura 108B), garantindo que os demais pontos de castanheiras sejam selecionados, excetuando-se o primeiro, que foi o escolhido como ponto inicial.

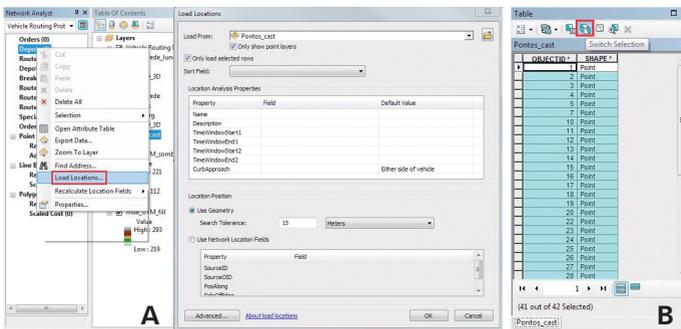


Figura 108. Processos: A) Para inclusão da árvore selecionada como início e final da rota; e B) Tabela de atributos com destaque para a inversão da seleção para os pontos atribuídos como destinos.

Novamente, na janela de conteúdos do “*Network Analyst*”, clique com o botão direito do mouse em “*Orders*” e selecione “*Load locations*”. Na janela que se abre, escolha a mesma camada especificada anteriormente em “*Load From*”, com a opção “*Only load selected rows*” selecionada (Figura 109).

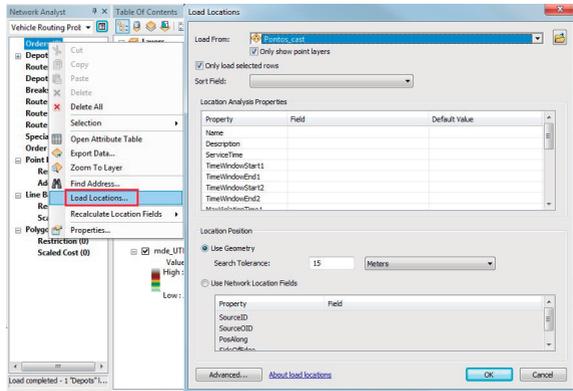


Figura 109. Processo para inclusão das árvores selecionadas como pontos de parada da rota.

É preciso ainda indicar nas propriedades da rota qual é o ponto inicial e final, além de alguns outros ajustes importantes. Na janela de conteúdos do “*Network Analyst*”, posicione o cursor sobre “*Routes*”, clique o botão direito do mouse e acesse a opção “*Add Item*” (Figura 110). Na janela aberta (“*Properties – Routes*”), configure as opções “*StartDepotName*” e “*EndDepotName*”, selecionando o ponto indicado como o início e fim do trajeto; nesse exemplo, o ponto *Location 1*. É importante lembrar que existe a opção “*MaxOrderCount*”, cujo valor-padrão é 30. Se o conjunto de dados que se está trabalhando exceder esse limite, será necessário alterar esse valor; caso contrário, o *ArcMap* buscará apenas os 30 melhores pontos para a solução da rota. Desse modo, mude o valor de 30 para 41 (42 árvores ao todo, menos 1). Feito isso, clique no botão *OK*.

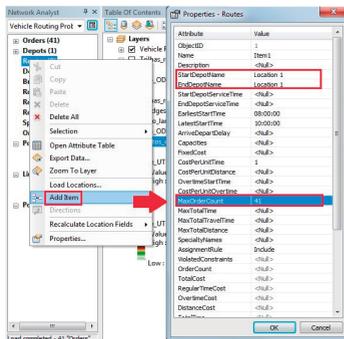


Figura 110. Configuração das propriedades da rota com destaque para especificação dos pontos inicial e final da rota e para o número máximo de paradas.

Clique em “*Layer Properties*”, , vá até a aba “*Analysis Settings*” para configurar as unidades corretas. Selecione as opções na caixa “*Settings*”, usando “*Tempo_tobler (Hours)*” para “*Time Attribute*”; “*Hours*” para “*Time Field Units*” e “*Meters*” como unidade de distância para “*Distance Field Units*” e também para “*Distance Units*” na caixa “*Directions*” (Figura 111).

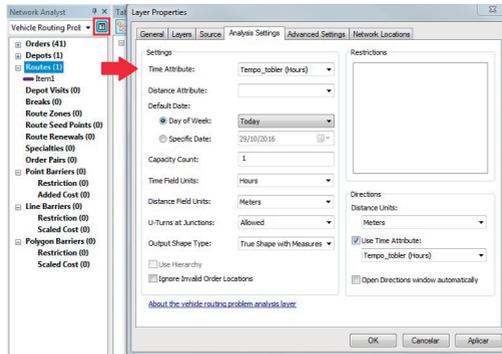


Figura 111. Acesso e configuração das propriedades para cálculo da rota, especificando-se o tempo de caminhada de Tobler como custo.

Após efetuadas todas as configurações, pressione o botão “*Solve*” da barra de ferramentas “*Network Analyst*” para resolver o problema. Será, então, gerada a rota otimizada, passando por todos os pontos e retornando ao ponto inicial especificado (Figura 112).

As rotas geradas são, por *default*, temporárias; porém, podem ser salvas como uma nova classe de feições, utilizando-se a opção de exportação de dados, disponível na tabela de conteúdos do “*Network Analyst*”, clicando-se com o botão direito do mouse sobre “*Routes*”. É possível também visualizar o tempo total e a distância percorrida, clicando-se com o botão direito do mouse em “*Route*” e selecionando “*Directions*” (Figura 113).

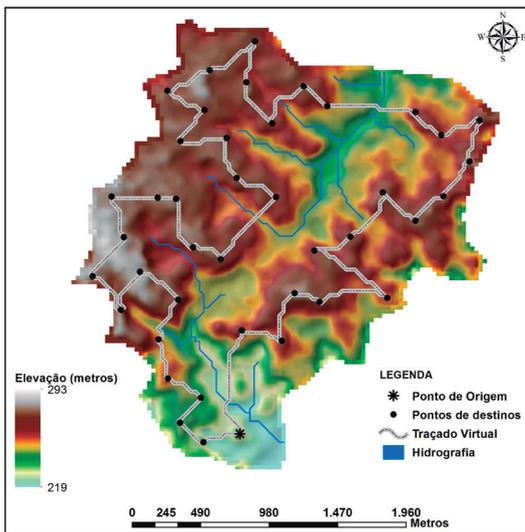


Figura 112. Rota otimizada para visitar um conjunto de árvores de interesse dentro da área de estudo, usando-se o tempo de caminhada de *Tobler* como impedância.

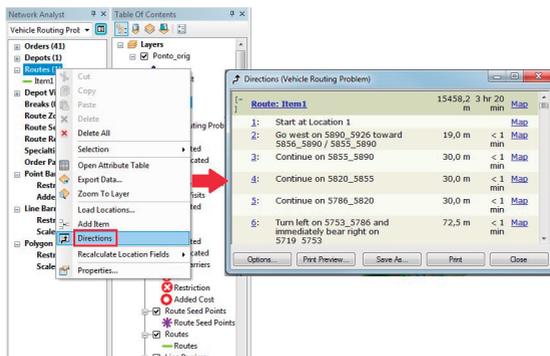


Figura 113. Acesso às informações de direções da rota, com o tempo total e distância percorrida.

Entrepósitos em análise de redes

Pode-se adotar também a localização de entrepostos para abastecimento e pós-transporte e acesso às demais árvores, sendo possível gerar um traçado para esses pontos e definir a partir destes quantas árvores são atendidas. Para isso, vamos iniciar escolhendo o conjunto de dados, que neste caso será a localização geográfica

das árvores. Novamente, acesse a aba de ferramentas do “*Network Analyst*” e escolha “*New Location-Allocation*” (Figura 114). Quando o objetivo é obter a solução para pontos do tipo entrepostos para atender determinadas paradas essa é a melhor opção.

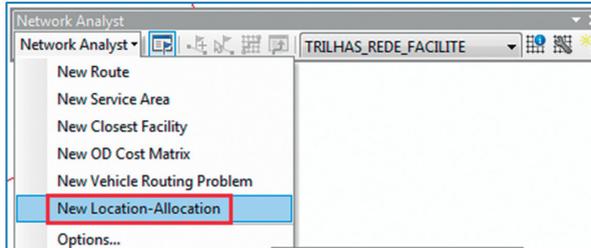


Figura 114. Caminho de acesso e destaque para a ferramenta “*New Location-Allocation*” para solução via PCV.

Com a estrutura criada, é necessário indicar quais pontos serão candidatos a entrepostos e quais são as demandas ou pontos a serem atendidos. Em “*Facilities*” serão adicionados os candidatos a entrepostos, que para este exemplo foram consideradas todas as árvores como potenciais. Para isso, clique com o botão direito em “*Facilities*” na janela de conteúdos do “*Network Analyst*”, escolhendo “*Load Location*” e em seguida em “*Load From*” insira a feição de interesse (*Pontos_cast*), (Figura 115).

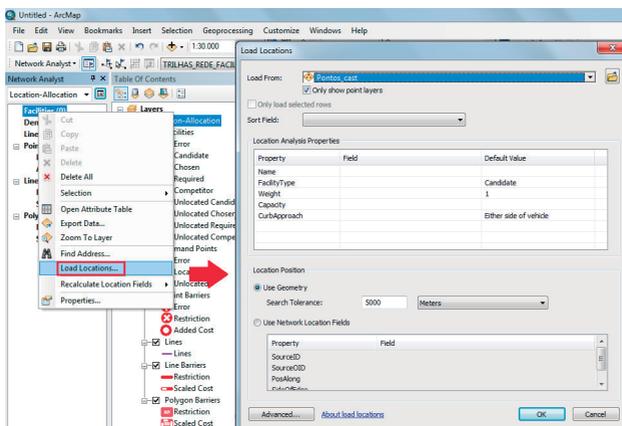


Figura 115. Processo para inclusão das árvores como “*Facilities*”.

Repita o mesmo processo, agora incluindo as árvores em “*Demand Points*” (Figura 116). Nessa etapa são indicadas todas as árvores ou pontos de parada que serão acessados; clique em *OK*.

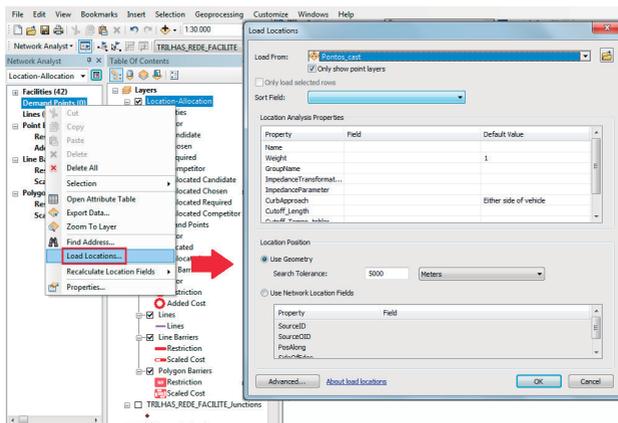


Figura 116. Processo para inclusão das árvores como demandas.

Note que, nesse exemplo, todas as árvores foram consideradas como potenciais entrepostos e igualmente como pontos de demandas, pois o objetivo é encontrar dentre as árvores aquelas que podem servir de entrepostos para atender às demais. O arranjo para a análise irá depender do conjunto de dados utilizado e poderá ser adaptado da melhor forma que atenda aos objetivos desejados. Antes de resolver o problema, é necessário configurar qual custo será tomado como referência e a quantidade de entrepostos que se deseja. Para isso acesse, na tabela de conteúdos do “*Network Analyst*”, em “*Layer Properties*”, “*Location-Allocation*” (Figura 117). Na janela aberta, vá até a aba “*Analysis Settings*” e em “*impedance*” selecione “*Tempo_tobler (Hours)*”, ou seja, calcular a partir do tempo; deixe como padrão as demais opções.

Na mesma janela aberta anteriormente de “*Layer Properties*”, vá até a aba “*Advanced Settings*” e digite a quantidade de entrepostos em “*Facilities To Choose*” (Figura 118). Ao digitar a quantidade, que nesse exemplo foi usado cinco, a análise de rede definiu as melhores árvores para servirem de entreposto para atender as demais que estão

próximas a eles, sempre considerando a velocidade de *Tobler*, ou seja, a declividade. Em “*Problem Type*” selecione “*Minimize Impedance*”, ou seja, sempre buscando minimizar o custo de impedância, no qual já foi indicado pela velocidade de *Tobler*; clique em **OK** (Figura 118).

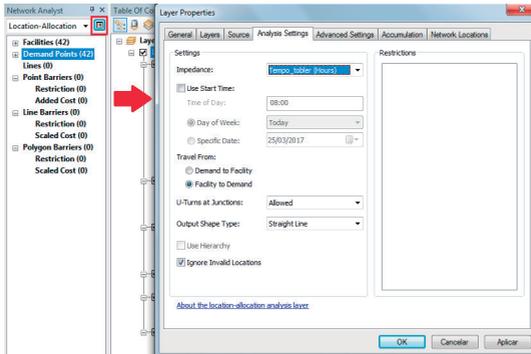


Figura 117. Acesso e configuração das propriedades do cálculo da rota para o tempo de caminhada de *Tobler*.

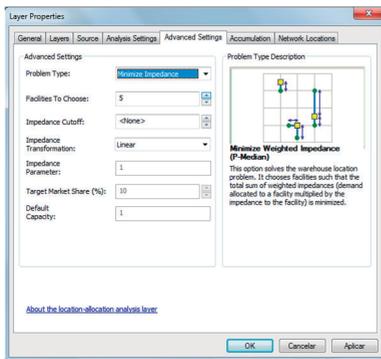


Figura 118. Configuração da quantidade de entrepostos dentro da área de estudo pela velocidade de *Tobler*.

Por último, da mesma maneira que as outras ferramentas, vá até o botão “**Solve**”  para resolver e obter a solução do problema. O resultado são os entrepostos e a indicação por uma linha reta de quais árvores é atendida por eles (Figura 119).

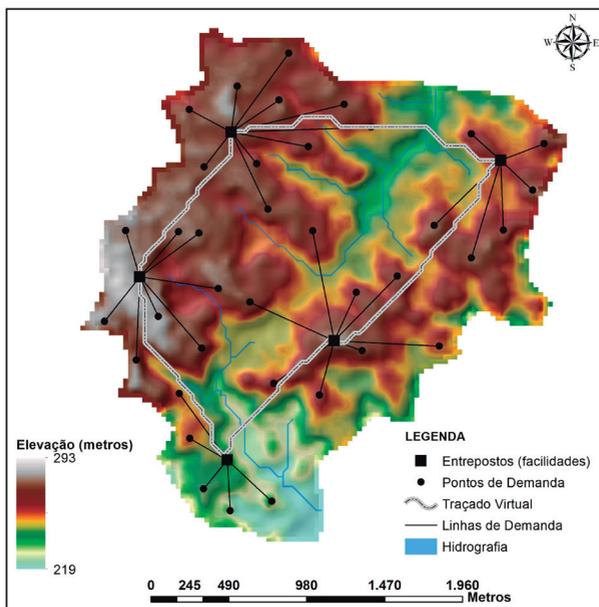


Figura 119. Rota otimizada para acesso a pontos estratégicos para acesso às árvores no local de estudo.

Outra opção é a percepção do usuário com relação ao relevo, analisando bacias hidrográficas e ponderando pelo conhecimento da realidade local para a definição de entrepostos, ou ainda, adaptar a localização com base no conhecimento geral das características da área. Com as ferramentas disponíveis na extensão “*Network Analyst*” são possíveis muitas formas de análises, sendo que o maior aprofundamento vai depender dos objetivos do usuário.

Considerações finais

O processo de otimização de trilhas para acesso a recursos florestais representa uma importante ferramenta para a melhoria de processos produtivos nos mais diversos ambientes florestais. Com o advento

dos Sistemas de Informações Geográficas, novos produtos têm sido gerados e mais conhecimentos se adquirem acerca do tema.

A busca por soluções tecnológicas aplicadas ao uso de recursos florestais é a direção para que o manejo e a exploração de produtos florestais ocorram de forma otimizada e harmônica. Assim, pelo caráter inovador da metodologia aqui apresentada, esta pode e deve sofrer alterações e melhorias com o desenvolvimento de diferentes abordagens, destacando-se o envolvimento das comunidades e os saberes locais.

Referências

ANTUNES, M. J. F. **Plano de voo apoiado em sistemas de informação geográfica**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica) – Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2008.

APPLEGATE, D. L.; BIXBY, R. E.; CHVATAL, V.; COOK, W. **The traveling salesman problem: a computational study**. Princeton: Princeton University Press, 2006. 606 p. Disponível em: <<http://press.princeton.edu/chapters/s8451.pdf>>. Acesso em: 20 de set. 2016.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS Desktop Web Help**. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/desktop/>> Acesso em: 27 out. 2016.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS® Desktop: release 10.3**. Programa para computador. Redlands, CA, 2014.

FERNANDES, S. F. **Desenvolvimento de ferramentas de apoio multicritério à decisão em problemas de localização**. 2013. 335 f. Tese (Doutorado em Estatística e Investigação Operacional) – Departamento de Estatística e Investigação Operacional, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. D. (Ed.). **Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2007. 183 p.

HERZOG, I. Theory and practice of cost function. In: CONFERENCE ON COMPUTER APPLICATIONS AND QUANTITATIV METHODS IN ARCHAECOLOGY, 38., 2010, Granada, Spain. **Anais...** Granada: Fusion of Cultures, 2010. p. 431-434.

HOFFMANN, E. H.; AEBI, K. Z.; BORTOLETO, S. Sistema de Roteirização Urbana. **Publicação UEPG**, Ponta Grossa, v. 4, p. 1-12, 2006. Disponível em: <[http://www .deinfo.uepg.br/~conged/artigo1.pdf](http://www.deinfo.uepg.br/~conged/artigo1.pdf)> Acesso em: 19 out. 2016.

MACHADO, K. J.; CALIJURI, M. L.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SANTOS, R. S. dos; FRANCO, G. B. Determinação automática da capacidade de armazenamento de um reservatório. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 62, p. 239-245, 2010.

MARTINS, V. S.; GUEDES, H. A. S.; CAPOBIANGO, G. V.; SILVA, D. D. da. A importância do condicionamento hidrográfico no estudo morfométrico de bacias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba, PR. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 5418-5425.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistema de Informações Geográficas**. 4 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 399 p.

RIBEIRO, C. A. A. S. **ENF644 – Otimização florestal**. Apostila. Viçosa: Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, 2016. 93 p.

RIBEIRO, C. A. A. S.; SOARES, V. P.; OLIVEIRA, A. M. S.; GLERIANI, J. M. O desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 203-212, 2005.

SÁSKA, Z. M.; DOMBAY, S. Determining minimum hiking time using DEM. **Geographia Napocensis**, n. 2, p. 124-129, 2012.

SHREVE, R. L. Statistical Law of Stream Numbers. **The Journal of Geology**, n. 74, p. 17-37, 1966.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p. 1117-1142, 1952.

TOBLER, W. **Three presentations on geographical analysis and modeling**: non- isotropic geographic modeling; Speculations on the geometry of geography; and Global Spatial Analysis. California: National Center for Geographic Information and Analysis, 1993. p. 26. (Technical Report 93-1).

ZIVIANI, N. **Projetos de algoritmos**: com implementação em PASCAL e C. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015. 639 p.

Divulgação e acabamento
Embrapa Amazônia Ocidental



Amazônia Ocidental

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



CGPE 14106