



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

UELISON MATEUS RIBEIRO

**ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO (MDTs) A
PARTIR DE DADOS LIDAR AEROTRANSPORTADO**

Prof. Dr. BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONÇA
Orientador

MSc. CARLOS ALBERTO SILVA
Co-orientador

SEROPÉDICA, RJ
NOVEMBRO - 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

UELISON MATEUS RIBEIRO

**ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO (MDTs) A
PARTIR DE DADOS LIDAR AEROTRANSPORTADO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONÇA
Orientador

MSc. CARLOS ALBERTO SILVA
Co-orientador

SEROPÉDICA, RJ
NOVEMBRO - 2015

**ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO (MDTs) A
PARTIR DE DADOS LIDAR AEROTRANSPORTADO**

UELISON MATEUS RIBEIRO

Monografia aprovada em 30 de novembro de 2015.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Bruno Araujo Furtado de Mendonça – UFRRJ
Orientador

MSc. Carlos Alberto Silva – University of Idaho
Membro e co-orientador

Prof. Dr. Rafael Coll Delgado– UFRRJ
Membro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus,
a toda minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por te me dado força e sabedoria quando precisei, além de proteção e saúde.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela experiência incrível e por proporcionar um ensino público e de qualidade.

Ao programa Ciência sem Fronteiras, pelas experiências acadêmicas, profissionais, culturais e aos amigos que fiz nos EUA.

À OpenTopography, por disponibilizar os dados utilizados nesse trabalho, que foram fundamentais na minha inserção nessa linha de estudo.

Ao doutorando Carlos Alberto Silva, por ter sido o idealizador da monografia, pela orientação, paciência e por me dar essa oportunidade única de trabalhar com essa nova tecnologia, o LiDAR.

Ao professor Bruno Araujo Furtado de Mendonça, por ter aceitado esse desafio, mesmo com toda a correria deste período, e pela amizade construída.

Ao professor Alexandre Monteiro, pela oportunidade de trabalhar no programa de educação tutorial (PET- FLORESTA) e sua amizade, por quem tenho grande admiração.

Ao professor Paulo Sérgio dos Santos Leles, por quem também tenho grande admiração e sempre esteve disposto a ajudar.

À Flora Jr. e a equipe que tive a oportunidade de fazer parte, por me proporcionar parte da formação que o meu curso carecia.

Aos membros da banca, Professor Rafael Col Delgado e o Doutorando Carlos Alberto Silva (já citado), pela contribuição valiosa nesse trabalho.

À Família M4 Cobertura por ter me acolhido em 2010 e passar a fazer parte da minha história. Especialmente, ao meu veterano de curso, Cléssio Gomes da Silva, por quem tenho grande admiração e por ter sido meu grande exemplo na graduação.

Aos grandes amigos que construí na turma da Engenharia Florestal 2010- I, sem eles meu caminho seria muito mais difícil. Especialmente ao Maycow Lucas Dutra Gomes Berbert, vulgo garça, grande amigo desde 2010; ao Henos Carlos Knupler Jordão Lisboa, vulgo Henos guaraná, pela parceria 2010-1014 e mais um amigo por quem guardo grande consideração; ao Nikolas, exemplo de positividade e companheiro de escaladas.

Aos demais amigos da rural, especialmente ao Ananias Júnior, cachaceiro, Allan Werner, meu bixo que formou antes de mim; João Flávio, vulgo joãozinho dos teclados, mais um cara brilhante que tive a oportunidade de conhecer.

Aos meus amigos do ensino fundamental e médio. Especialmente ao Américo, Geovane, Silvério (*in memoriam*), Gilmar, Hamilton, Leandro e Thiago.

Aos meus pais por serem o pilar da minha existência, sem eles nunca teria conseguido alcançar mais essa etapa da minha vida. O meu pai, Élio de Jesus Ribeiro, por seu esse grande

exemplo de trabalho duro e força de vontade e a minha mãe, Lúcia Ananias Miranda Ribeiro, pelo carinho, paciência e preocupação (por que não dizer?) em todos esses anos e por terem me apoiado nas minhas escolhas mesmo sabendo que a partir dessas escolhas estaria cada vez menos em casa.

Aos meus irmãos, Washington, com quem compartilhei mais de 70% da minha vida, desde quando me entendo por gente até o final do ensino médio e, mesmo seguindo caminhos diferentes após isso, continuamos contando um com o outro; e ao Chinaider, o caçula, que nunca entende que eu tenho que voltar pra rural...

Por fim, a toda a minha família; primos e primas, tios e tias, meus avôs (vô Arthur e vô Tatão) e minhas avós (vó Terezinha e vó Cila) e todos que me ajudaram quando precisei (e não foram poucas vezes, nem poucas pessoas). Me sinto muito agradecido e obrigado a retribuir toda a ajuda que já tenho recebido em minha caminhada, fundamentalmente para contribuir com quem precisar dessa assistência que eu tenho recebido e poder fazer mais pela sociedade.

RESUMO

O uso da tecnologia LiDAR tem se consolidado como ferramenta capaz de aumentar a acurácia dos levantamentos no campo das geociências, bem como de estudos da estrutura da floresta. O objetivo deste trabalho foi comparar três algoritmos utilizados para a extração de pontos LiDAR referente ao terreno para a geração de modelos digitais de terrenos (MDTs) em cinco ambientes diferentes. Os Algoritmos implementados nas ferramentas *Groundfilter*, *MCC Filter* e *LASground* foram comparados nos ambientes urbano (Boulder Creek Critical Zone Observatory – Colorado), desértico (Modeling of Meander Channel Evolution – Nevada), Florestal (Moscow Mountain – Idaho), agrícola (New Madrid Seismic Zone – Arkansas/Missouri), e arbustivo (Sierra National Forest – Califórnia), todos no território americano. Os dados foram adquiridos pelo portal OpenTopography. Para cada ambiente foram recortadas três áreas de 200 x 200 m e gerado um MDT por filtro para cada área, totalizando 45 MDTs com resolução de 1 x 1 m. Com auxílio do ArcGIS 10.2 foram gerados mapas, histogramas de frequência das elevações e estatísticas da diferença entre os MDTs de cada área. O algoritmo implementado na ferramenta *LASground* se destacou entre os algoritmos com MDTs com menos defeitos (outliers negativos e/ou positivos), seguido pelo do algoritmo implementado no *Groundfilter*. O algoritmo do *MCC filter* foi o algoritmo como mais defeitos associado à presença de *outliers*. Porém, todos se apresentaram satisfatórios para a maior parte das áreas testadas, com pequenos defeitos a serem editados manualmente. A área urbana foi a mais problemática, onde as edificações foram ineficientemente removidas para as áreas um e dois.

Palavras-chave: LiDAR, MDT, Fusion, MCC, LAStools, filtragem de pontos.

ABSTRACT

The LiDAR technology has been established as a tool able to increase the accuracy of surveys in the field of geosciences, as well as in studies of the forest structure. This work aims to compare three algorithms used in the extraction of ground points to generate DTMs in five different land cover classes, as well as different point densities. The algorithms *Groundfilter*, *MCC Filter* and *LASground* were compared in urban (Boulder Creek Critical Zone Observatory – Colorado), desertic (Modeling of Meander Channel Evolution – Nevada), Forest (Moscow Mountain – Idaho), agricultural (New Madrid Seismic Zone – Arkansas/Missouri), and shrubby (Sierra National Forest – California) land cover types, all of them in the United States. All LiDAR data were available by the OpenTopography portal. Three 200 x 200 m areas were clipped for each land cover class and it was generated a DTM per filter per area, summing 45 DTMs with a 1 x 1 m spatial resolution. ArcGIS 10.2 was used to create maps, elevation frequency histograms, and the difference among the DTMs of each area. *LASground* highlighted with less blunders among the algorithms, followed by *Groundfilter*. *MCC filter* was the algorithm that generated more *outliers* among those studied in their default configuration. However, all of them presented to be satisfactory for most tested areas, with few blunders to be manually edited. The urban cover type was the most problematic, in which edifications were not efficiently removed in areas one and two.

Keywords: LiDAR, DTM, Fusion, MCC, LAStools, point filtering.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. REVISÃO DE LITERATURA	2
3.1 LiDAR	2
3.2 Geração de Modelos Digitais de Terreno (MDTs) a partir de dados LiDAR	4
3.2.2 LASground	5
3.2.3 MCC Filter	6
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
4.1 Caracterização das áreas de estudo	7
4.1.2 Boulder Creek Critical Zone Observatory – Colorado.....	8
4.1.3 Modeling of Meander Channel Evolution – Nevada.....	9
4.1.4 Moscow Mountain – Idaho.....	9
4.1.5 New Madrid Seismic Zone - Arkansas/Missouri	9
4.1.6 Sierra National Forest – California	10
4.2 Geração dos MDTs.....	10
4.2.1 Recorte das áreas de interesse	11
4.2.2 FUSION/LDV	13
4.2.2.1 Filtragem	13
4.2.2.2 Criação dos MDTs e conversão para o formato ASCII.....	13
4.2.3 LAStools.....	15
4.2.4 MCC	15
4.3 Comparação dos modelos.....	16
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5.1 Produtos gerados para cada cobertura do solo	18
5.1.1 Ambiente urbano	18

5.1.2 Ambiente desértico.....	23
5.1.3 Ambiente florestal.....	26
5.1.4 Ambiente agrícola.....	29
5.1.5 Ambiente arbustivo.....	32
6. CONCLUSÃO.....	35
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Resumo das áreas de estudo: Local, ambiente de interesse, data do sobrevoo, quantidade total de retornos LiDAR e densidade de pontos	7
Tabela 2.	Coordenadas geográfica dos pontos inferior esquerdo (Xmin, Ymin) e superior direito (Xmax, Ymax) para cada unidade amostral (UA), nos cinco sítios de dados LiDAR	11

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** Esquema operacional do sistema LiDAR aerotransportado. Fonte: Giongo et al. (2010). 3
- Figura 2** Distribuição das áreas de estudo pelos Estados Unidos da América (A), Sierra National Forest – Califórnia (B), Modeling of Meander Channel Evolution – Nevada (C), Moscow Mountain - Idaho (D), Boulder Creek Critical Zone Observatory – Colorado (E) e New Madrid Seismic Zone - Arkansas/Missouri (F). Polígonos em vermelho representam as áreas com dados LiDAR. Fonte: US Census Bureau (A) e Dados cartográficos Google (B-F).8
- Figura 3** Unidades amostrais isoladamente após o recorte feito pela linha de comando clipdata (Fusion). UAs no ambiente: Urbano em Boulder Creek Critical Zone Observatory, CO (A, B e C); desértico em Modeling of Meander Channel Evolution, NV (D, E e F); florestal em Moscow Mountain, ID (G, H e I); agrícola em New Madrid Seismic Zone, AR/MO (J,K e L) e arbustivo em Sierra National Forest, CA (M, N e O). A visualização dos dados foi feita no programa PointVue LE. 12
- Figura 4** Modelo usado para converter os MDTs inicialmente no formato .ASC para planilhas de excel no formato .XLS. Modelo construído no ModelBuilder, ArcGIS 10.2. 17
- Figura 5** MDTs gerados para o ambiente urbano acompanhados dos seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados para as áreas 1, 2 e 3 pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i). 20
- Figura 6** Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente urbano. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g), MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i). 22
- Figura 7** MDTs gerados para o ambiente desértico acompanhados dos seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados para as áreas 1, 2 e 3 pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i). 24
- Figura 8** Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente desértico. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g), MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i). 25
- Figura 9** MDTs gerados para o ambiente florestal acompanhados dos seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados para as áreas 1, 2 e 3 pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i). 27
- Figura 10** Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente florestal. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g),

MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i). 28

Figura 11 MDTs gerados para o ambiente agrícola acompanhados de seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados para as áreas 1, 2 e 3 pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i). 30

Figura 12 Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente agrícola. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g), MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i). 31

Figura 13 MDTs gerados para o ambiente arbustivo acompanhados de seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i) para a área 1 (a, b e c), 2 (d, e e f) e 3 (g, h e i). 33

Figura 14 Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente arbustivo. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g), MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i). 34

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente urbano	38
Apêndice 2. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente desértico	39
Apêndice 3. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente florestal	40
Apêndice 4. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente agrícola	41
Apêndice 5. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente arbustivo	42

1. INTRODUÇÃO

O mapeamento utilizando o LiDAR (do inglês, *Light Detection And Ranging*) aerotransportado tem conquistado grande aceitação nos últimos anos (HUG et al, 2004). Em áreas florestais, tem permitido o levantamento de dados da estrutura vertical e horizontal com alta acurácia (GIONGO et al, 2010). No entanto, sua função não é substituir os dados oriundos da coleta de campo, de forma alguma, uma vez que a experiência do profissional por trás da máquina é que dá sentido aos dados e transforma-os em informação. Para isso, a sensibilidade adquirida no campo ainda é fundamental. A novidade está na possibilidade de adquirir uma grande quantidade de dados (variáveis) em um curto intervalo de tempo, com erros cada vez menores e altíssima precisão e exatidão (GIONGO et al, 2010). O resultado disso são operações com maiores níveis de detalhamento, o que no setor florestal se reflete em menor impacto e maior aproveitamento dos recursos, bem como uma vantagem competitiva (aquela associada ao domínio de qualquer nova tecnologia). Além disso, essa ferramenta vem se tornando acessível à medida que vem conquistando os profissionais que atuam nesse campo (sensoriamento remoto, manejo de recursos naturais), como acontece com qualquer produto novo no mercado.

O LiDAR é uma ferramenta do sensoriamento remoto com capacidade de aumentar a acurácia de métricas biofísicas e que adiciona a terceira dimensão às análises espaciais (LEFSKY et al., 2002). Segundo este autor, este é um tipo de sensor que mede, tridimensionalmente, a estrutura do dossel de uma floresta, bem como a topografia abaixo dela. Como resultado são gerados mapas topográficos de alta resolução espacial e estimativas muito acuradas da altura da vegetação. Além disso, estimativas de Índice de Área Foliar (IAF) e biomassa acima do solo decorrentes dos dados LiDAR têm se mostrado altamente eficientes (JUPP & LOVELL, 2002).

O primeiro passo na manipulação de dados LiDAR é gerar um Modelo Digital de Terreno (MDT) de qualidade, uma vez que este será usado em vários momentos à medida que o projeto avança, independente da natureza do mesmo. Microzoneamento digital, modelagem de hidrografia, modelagem de dossel, modelo de densidade relativa da vegetação e estimativa da biomassa são bons exemplos onde um MDT de qualidade é essencial e decisivo para um processamento mais acurado dos dados.

Para geração de MDTs a partir de dados LiDAR, por sua vez, é necessário realizar primeiramente a filtragem dos retornos LiDAR que constituem a superfície do terreno livre de vegetação ou qualquer outro tipo de objeto.

Atualmente existem algumas opções de algoritmos para que realizam essa extração dos pontos LiDAR referentes ao terreno. Entre eles destacam-se o algoritmo de filtragem adaptado de Kraus e Pfeifer (1998) e baseado na predição linear (KRAUS & MIKHAIL, 1972; como citado por KRAUS & PFEIFER, 1998), que foi implementado na ferramenta *Groundfilter*, parte do pacote Fusion, desenvolvido na *Pacific Northwest Research Station* (Estação de Pesquisas do Pacífico Noroeste) pelo Serviço Florestal Americano (MCGAUGHEY, 2014), o algoritmo baseado na classificação pela curvatura em multiescalas – MCC (do inglês *Multiscale Curvature Classification*) – desenvolvido por Evans e Hudak (2007) e o algoritmo baseado no método da densificação de progressivos *Triangular Irregular Networks* (TINs) desenvolvido por Axelsson (2000) e implementado na ferramenta *LASground*, presente no *software* LAStools, por Isenburg (LUDWING BOLTZMANN INSTITUTE, 2015). As duas primeiras ferramentas estão disponíveis gratuitamente, diferentemente da terceira que possui uma versão livre, mas limitada a uma certa quantidade de dados. Fato este que pode influenciar na escolha da ferramenta a ser utilizado. Todavia, se

tratando de diferentes algoritmos, pode haver comportamentos diferentes entre eles em função do tipo de cobertura da terra. Dessa forma, um algoritmo pode gerar melhores modelos para determinado ambiente (florestal, por exemplo), mas não produzir bons resultados em outro (urbano, talvez). Identificar se há diferença entre eles torna-se, assim, fator chave na escolha do algoritmo a ser usado.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi comparar três algoritmos implementados nas ferramentas– *Groundfilter*, *MCC Filter* e *LASground* – utilizados na filtragem dos pontos da superfície do terreno para geração de MDTs a partir de dados LiDAR aerotransportado em cinco diferentes coberturas da terra - Florestal, urbana, arbustiva, agrícola e desértica; bem como, em diferentes densidades de pontos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 LiDAR

O LiDAR é um tecnologia de sensoriamento remoto que utiliza a luz laser para medir distâncias (MCGAUGHEY, 2014). O LASER (do inglês, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), por sua vez, refere-se a teoria para obtenção da *amplificação de luz por emissão estimulada de radiação* estabelecida pela primeira vez por Schawlow & Townes (1958), baseados nos fundamentos de Einstein de 1917 (GIONGO et al., 2010) e que teve seu uso associado a medição de distâncias na década de 1980 (GIONGO et al., 2010). Em aplicações terrestres, o comprimento de onda do laser geralmente possui uma amplitude de 900 a 1064 nanômetros (infravermelho), no qual as plantas apresentam alta refletância (LEFSKY et al., 2002). Assim, o LiDAR é um sistema remoto ativo capaz de mapear o terreno e objetos acima deste, tais como vegetação e edificações, com acurácia vertical submétrica (BATER & COOPS, 2009), providenciando informação nas direções horizontal e vertical (YUNFEI et al, 2008).

No sistema LiDAR aerotransportado, os equipamentos são montados em um avião mono ou bimotor, ou mesmo helicóptero, para aquisição dos dados em grandes áreas (MCGAUGHEY, 2014). Seu funcionamento baseia-se na emissão de um pulso laser com alta frequência de repetição (GIONGO et al., 2010). Cerca de 200 mil pulsos são emitidos por segundo (MCGAUGHEY, 2014). A distância entre o sensor e o alvo é obtida em função do tempo entre a emissão do pulso e a chegada da reflexão deste pulso no receptor do sensor (LEFSKY et al., 2002). Os dados LiDAR são então disponíveis como uma nuvem de pontos que pode ser dividida em pontos de terreno e pontos acima do terreno (*non-terrain*) (KRAUS & PFEIFER, 1998).

Este equipamento é composto por um emissor-receptor de escaneamento a laser anexado ao avião; unidades do Sistema de Posicionamento Global (GPS) sobre o avião e em terra e uma unidade de mensuração inercial (IMU) anexada ao scanner (GIONGO et al., 2010) além de um computador para controle e armazenamento de dados (figura 1)

(MCGAUGHEY, 2014). O GPS e o IMU (também conhecido por Sistema de Navegação Inercial, do inglês, *Inertial Navigation System* – INS) determinam a localização precisa e a altitude do laser scanner à medida que os pulsos são emitidos e então calcula a coordenada exata de cada ponto, sendo assim essenciais para o funcionamento do escaneamento a laser (KRAUS & PFEIFER, 1998). O IMU corrige o GPS dos erros causados pelo balanceio, empinamento e cabeceio da aeronave (MCGAUGHEY, 2014).

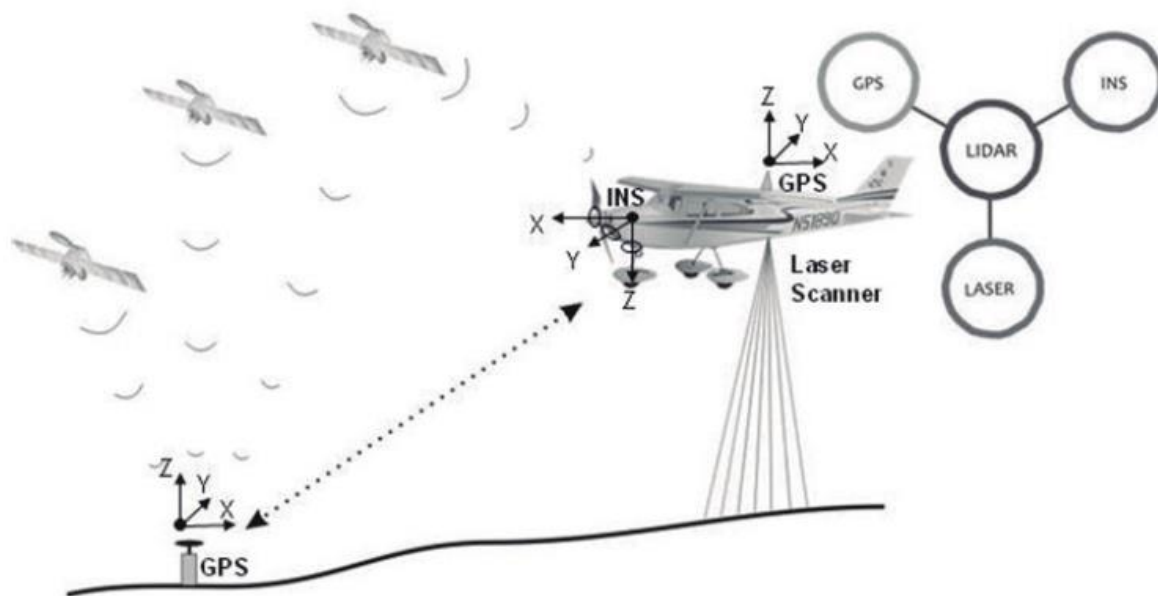


Figura 1 Esquema operacional do sistema LiDAR aerotransportado. Fonte: Giongo et al. (2010).

O mapeamento topográfico com a tecnologia do LiDAR aerotransportado já é largamente utilizado (KRAUS & PFEIFER, 2001). Seu uso comercial teve início em meados dos anos 1990 (YAN et al., 2015). Nos Estados Unidos, seus primeiros usos estavam associados à identificação da vegetação invasora nos corredores de linhas de energia (MCGAUGHEY, 2014). Em seguida, agências federais nos EUA começaram a usá-lo para mapear o terreno em planícies de inundação e zonas com risco de terremoto (MCGAUGHEY, 2014).

O seu uso no mapeamento de grandes áreas se tornou possível devido a sua velocidade e alta acurácia, em detrimento das equipes de levantamento de campo que consomem muito tempo e possuem alto custo associado (MCGAUGHEY, 2014). Por sua vez, a fotogrametria não produz resultados acurados em áreas florestais, onde não é possível ver o terreno (LEFSKY et al., 2002), fato que não é um limitante para o sistema LiDAR que, mesmo em florestas com dossel bastante denso, apresenta um grande número de retornos atingindo o relevo (LEFSKY et al., 2002). Diferentemente do que ocorre com os sensores clássicos passivos, os scanners a laser não precisam da luz solar (GIONGO et al., 2010) e, por isso, podem trabalhar dia e noite (KRAUS & PFEIFER, 1998) pois emitem sua própria energia, sendo definidos assim como sensores ativos (GIONGO et al., 2010).

Na área florestal, a aplicação de dados LiDAR na determinação de variáveis biofísicas da floresta, tais como Diâmetro na Altura do Peito (DAP), altura do estrato dominante (Ht), diâmetro de copa, área basal, Índice de área foliar (IAF), volume de madeira, biomassa acima do solo, estoque de carbono, entre outros podem ser encontrados nos trabalhos de Jupp & Lovell (2002) e Giongo et al. (2010). Em florestas plantadas, a intensidade e escala destes

produtos oriundos da nuvem de pontos LiDAR são mais detalhadas (JUPP & LOVELL, 2002). Adicionalmente, D'Oliveira et al. (2012) utilizou dados LiDAR aerotransportado para identificar áreas de manejo de baixo impacto na Floresta Estadual do Antimary, no estado do Acre.

No que diz respeito à produção científica envolvendo essa tecnologia na academia brasileira, destacam-se os trabalhos de D'Oliveira et al. (2012), Silva et al. (2013), Figueiredo et al. (2014), Giongo et al. (2010), Pacheco et al. (2011), entre outros dos quais muitos incluem a participação destes autores.

3.2 Geração de Modelos Digitais de Terreno (MDTs) a partir de dados LiDAR

Na área de geociências, o uso de MDTs está relacionado à delimitação de bacias hidrográficas e extração de hidrografia, análises geológicas, determinação do comprimento e inclinação de rampa na modelagem do potencial erosivo dos solos, planejamento de estradas, terraplenagem, etc. (REUTEBUCH et al., 2005). Adicionalmente, métricas extraídas de dados LiDAR geralmente baseiam-se na altura em relação aos modelos do terreno e de superfície (DSM) (BATER & COOPS, 2009). Quando se refere a dados LiDAR, o DTM pode ser definido como uma superfície contínua, suave e sem nada visível em baixo (HAUGERUD & HARDING, 2001). A separação dos retornos que atingiram o terreno daqueles acima do mesmo é um desafio devido à convolução dos retornos do terreno e da vegetação na nuvem de pontos ainda não classificada (EVANS & HUDAK, 2007). Por isso, diversos algoritmos para extração dos pontos que representam o terreno sem cobertura (terreno nu) tem sido desenvolvidos (SITHOLE & VOSSSELMAN, 2004).

Esse processo de remoção de objetos que não constituem o terreno para obtenção do terreno nu é conhecido como filtragem (POLAT & UYSAL, 2014). Entre os algoritmos de filtragem comumente usados destacam-se o i) algoritmo de filtragem baseado na predição linear implementado na ferramenta *Groundfilter*, ii) o algoritmo baseado no método da densificação de progressivos TINs implementado na ferramenta *LASground* e o iii) algoritmo baseado na classificação pela curvatura em multiescalas presente no *MCC Filter*; objetos deste estudo. A seguir é apresentada a descrição de cada filtro.

3.2.1 GroundFilter

Groundfilter é uma ferramenta utilizada para a filtragem de pontos LiDAR referente ao terreno. O algoritmo implementado refere-se ao trabalho de Kraus e Pfeifer (1998) que foi incorporado por McGaughey (2012) ao *Groundfilter*, do FUSION/LDV. FUSION/LDV é um software de uso livre desenvolvido pela Estação de Pesquisas do Pacífico Noroeste do Serviço Florestal Americano para dar suporte as pesquisas envolvendo dados LiDAR. Enquanto o Fusion projeta os dados em 2D usando uma série de tipos de dados e formatos, o LDV (LiDAR data viewer) apresenta uma visão tridimensional dos dados que permite examinar e medir amostras da área de estudo. Linhas de comando completam o pacote, permitindo diversos tipos análises dos dados LiDAR.

O seu funcionamento é baseado em uma predição linear (KRAUS E MIKHAIL, 1972; como citado por MCGAUGHEY, 2012) no qual cada medida possui sua própria acurácia. Na primeira etapa do processo de filtragem, estabelece-se uma superfície (superfície intermediária) entre o que seria a superfície do dossel e o terreno propriamente dito, para o qual todos os pontos LiDAR possuem o mesmo peso. Em seguida, cada ponto recebe um peso

com base na distância e direção para a superfície gerada (KRAUS & PFEIFER, 1998). Para isto, a seguinte equação é usada:

$$p_i = \begin{cases} 1 & v_i \leq g \\ \frac{1}{1 + (a(v_i - g)^b)} & g < v_i \leq g + w \\ 0 & g + w < v_i \end{cases}$$

Em que:

a e b são parâmetros que caracterizam o slope da função ponderada, em que $a = 1,0$ e $b = 4,0$ produzem bons resultados na maioria dos casos.

g é um limite de deslocamento em relação a superfícies intermediária. Pontos que estiverem abaixo dessa superfície e forem maiores do que o valor de g , ou seja, que estiverem mais distantes da superfície do que g , receberão o peso máximo de 1,0.

w é um parâmetro de deslocamento em relação ao terreno e define o limite superior de influência dos pontos em relação a superfície intermediária.

Assim, cada ponto passa a ser ponderado em relação a sua distância para a superfície intermediária. Pontos que estiverem abaixo dessa superfície e forem maiores do que o valor de g , ou seja, que estiverem mais distantes da superfície do que g , receberão o peso máximo de 1,0. Por sua vez, pontos acima do nível definido por $(g + w)$ recebem o peso de 0,0. Esse processo se repete até se alcançar uma superfície intermediária final. Nesse momento, os pontos com valores de elevação menor ou igual a g (primeira condição da função), ou que forem maiores que g e menores ou iguais a $(g + w)$ (segunda condição da função) serão classificados como pontos do terreno nu (KRAUS & PFEIFER, 1998).

3.2.2 LASground

LASground é uma ferramenta do software *LAStools* desenvolvido por Isenburg (2015) para extração de pontos referentes ao terreno. Ele classifica pontos LiDAR em pontos de terreno (classe 2) e não pertencentes ao terreno (classe 1) usando o método de filtragem pela densificação de progressivos TINs (*Progressive TIN Densification*) elaborado por Axelsson (2000). Este método consiste em usar TINs para gerar uma superfície conectada de baixo para os pontos LiDAR distribuídos sub-aleatoriamente, adicionando novos pontos à medida que estes atendem alguns parâmetros limiares derivados dos dados (AXELSSON, 2000). Os parâmetros que controlam a filtragem no *LASground* são: *step*, que determina a escala; *spike*, que remove pontos acima e abaixo de TIN grosseiro; *offset*, que define o nível máximo de inclusão de novos pontos na superfície de terreno atual; e *standard deviation*, que determina o desvio padrão máximo para manchas planas (LUDWING BOLTZMANN INSTITUTE, 2015). O processo descrito por Axelsson (2000) segue a seguinte sequência:

- i. Calcula-se os parâmetros iniciais usando todos os dados
- ii. Seleciona-se “pontos sementes” (seed points)
- iii. Intensificação iterativa do TIN: calcula-se parâmetros para cada iteração dos pontos incluídos no TIN e então adiciona-se ao TIN aqueles pontos abaixo dos valores limiares.
- iv. Esse processo continua até todos os pontos estejam classificados como terreno ou objeto.

O usuário pode definir os parâmetros manualmente ou usar as estratégias padrões predefinidas *forest or hills* (florestas ou encostas), *town or flats* (pequenas cidades ou áreas planas), *city or warehouses* (cidades ou depósitos) e *metropolis* (metrópolis) (ISENBURG, 2015). Além disso, o usuário dispõe de cinco ‘flags’ (bandeiras) para descreverem a rugosidade do terreno que podem ser utilizadas no lugar das estratégias predefinidas (LUDWING BOLTZMANN INSTITUTE, 2015). São elas: *-fine*, *-extra-fine* ou *-ultra-fine*, para intensificar a busca por pontos iniciais em encostas muito inclinadas, por exemplo; e *-coarse* ou *-extra-coarse*, que simplifica a pesquisa por pontos iniciais (terrenos planos).

Em sua configuração padrão, apenas o último retorno é considerado na filtragem dos pontos de terreno nu (ISENBURG, 2015).

3.2.3 MCC Filter

A classificação pela curvatura em multiescalas (do inglês, *multiscale curvature classification* – MCC) é um algoritmo desenvolvido por Evans e Hudak (2007) que classifica os retornos LiDAR automaticamente por meio da filtragem com base na curvatura. É um modelo que, iterativamente, classifica pontos LiDAR como não pertencentes ao terreno quando estes excedem o limiar positivo da curvatura, em múltiplas escalas (EVANS & HUDAK, 2007). Este algoritmo se baseia na característica de suavidade do terreno, de forma que pontos que participam da formação de grandes curvaturas em escala local são removidos (HAUDERUD & HARDING, 2001).

De acordo com Evans e Hudak (2007), o processo de classificação deste algoritmo segue a seguinte sequência:

- i. Uma superfície raster é interpolada usando um vetor $Z(s)$ pelo método *Thin-Plane Spline* (TPS), em que $Z(s)$ corresponde as coordenadas XY e a elevação Z de toda a nuvem de pontos. São aplicados dois parâmetros modelo para a escala de domínio l . A escala de domínio l é um loop modelo no qual um conjunto de parâmetros são executados até a convergência. Estes parâmetros são a) a escala λ , referente à resolução da célula, assume os valores 0,5, 1 e 1,5, respectivamente na primeira, segunda e terceira iteração e b) a tolerância de curvatura t , que pode assumir valores de 0,1 – 0,6 na primeira escala de domínio e obrigatoriamente 0,1 nas escalas de domínio subsequentes. Os valores iniciais dos parâmetros λ e t são definidos pelo usuário.
- ii. Aplica-se o método da densidade de kernel com matriz 3 x 3 sobre a superfície interpolada. Um novo vetor $x(s)$ é estabelecido como coincidente com $Z(s)$.
- iii. A fórmula $c = x(s) + t$ é usada para calcular a curvatura na escala de domínio l . Em que $x(s)$ é a média de elevação do vetor coincidente com $Z(s)$ na escala de domínio l e t corresponde a tolerância de curvatura na escala de domínio l .
- iv. Pontos LiDAR são classificados como não pertencentes ao terreno e removidos se atenderem a condição: Se $Z(s) > c$, logo classificam-se como não pertencentes ao terreno. Em que c é a curvatura na escala de domínio l e $Z(s)$ é a elevação LiDAR medida.
- v. O limiar de convergência j é então aferido e o modelo itera (repete) ou começa com a próxima escala de domínio.

A iteração ocorre em dois níveis: a) cada escala de domínio ($l = 1 - 3$) onde parâmetros são definidos e mudados quando os critérios de convergência são alcançados e b)

um ‘loop aninhado’ (do inglês, *nested loop*) definindo a convergência do modelo j dentro de l , no qual se utiliza um único conjunto de parâmetros do modelo. Os Parâmetros λ e t são alterados quando o modelo converge dentro de uma escala de domínio. O algoritmo segue para a próxima escala de domínio até o limiar de convergência j ser alcançado no final do domínio, momento em que o algoritmo finaliza a filtragem.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização das áreas de estudo

O presente trabalho foi realizado com dados LiDAR aerotransportado de cinco diferentes regiões dos Estados Unidos (Figura 2). Esses dados foram disponibilizados pelo portal *Open Topography*, uma fonte de dados e ferramentas de alta resolução pertencente a Fundação de Ciência Nacional (do inglês, *National Science Foundation - NSF*). Cada região visou representar uma das seguintes coberturas de terra: urbana, desértica, florestal, agrícola e arbustiva. Adicionalmente, elas apresentam diferentes densidade de pontos (Tabela 1). Nesse sentido, as áreas de estudo estão localizadas, respectivamente, em Boulder Creek Critical Zone Observatory (CO), Modeling of Meander Channel Evolution (NE), Moscow Mountain (ID), New Madrid Seismic Zone (AR/MO) e Sierra National Forest (CA). Em cada uma dessas regiões foram selecionadas três áreas de 200 x 200 m em pontos diferentes da paisagem afim de capturar variações no relevo e na cobertura de terra da região (com exceção da segunda e terceira unidades na região de vegetação arbustiva que possuem, respectivamente, 300 x 200 m e 400 x 400 m).

Tabela 1 Resumo das áreas de estudo: Local, ambiente de interesse, data do sobrevoo, quantidade total de retornos LiDAR e densidade de pontos.

Local	Ambiente de interesse	Data de aquisição dos dados	Área (km ²)	Retornos LiDAR (pontos)	Densidade (pts/m ²)
Boulder Creek Critical Zone Observatory - CO	Urbano	21- 26/08/2010	600,0	7.355.678.903	11,33
Modeling of Meander Channel Evolution - NV	Desértico	7/8/2010 13 e	32,7	183.314.352	4,06
Moscow Mountain - ID	Florestal	14/08/2003	327,0	113.191.977	0,35
New Madrid Seismic Zone - AR/MO	Agrícola	30/01 a 26/02/2012	1936,0	17.165.130.273	8,87
Sierra National Forest – CA	Arbustivo	26 e 27/08/2005	50	111.007.052	2,22

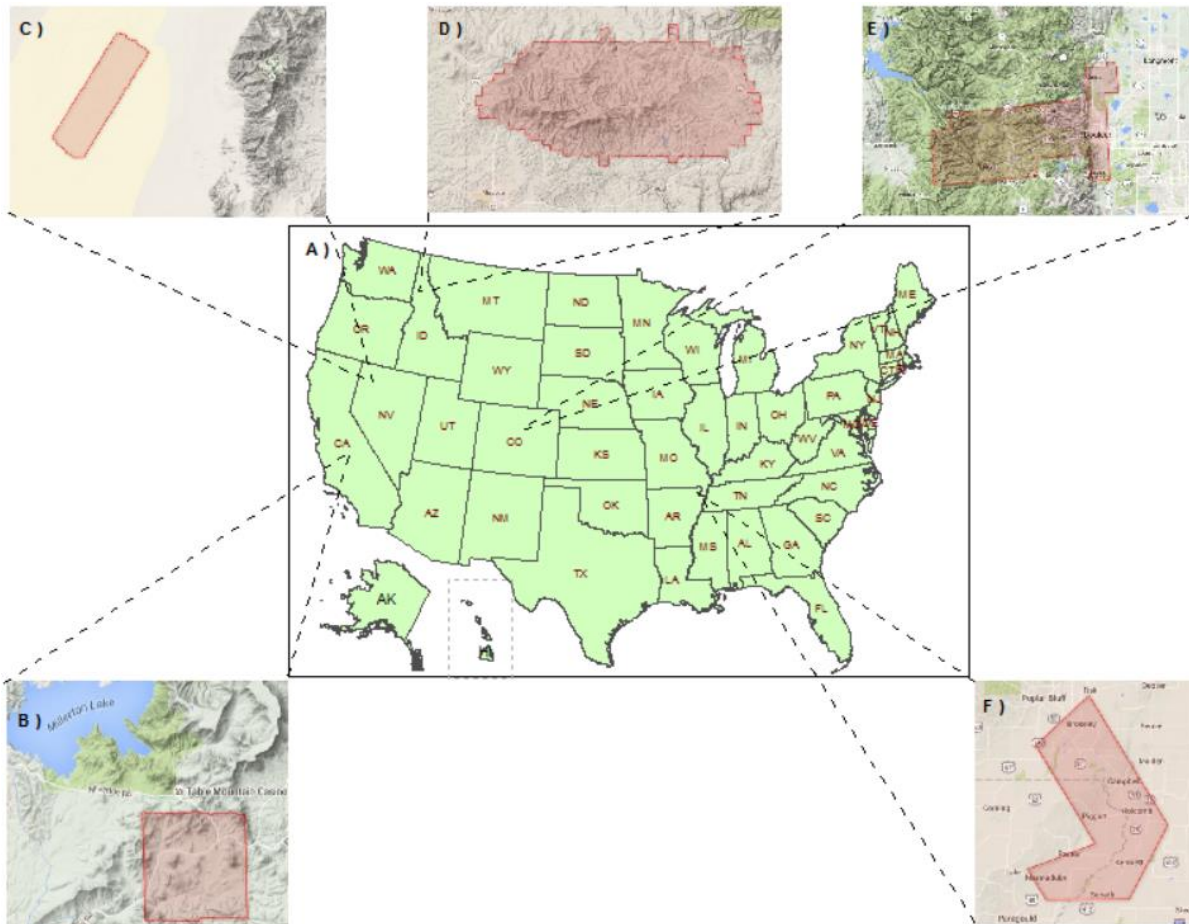


Figura 2 Distribuição das áreas de estudo pelos Estados Unidos da América (A), Sierra National Forest – Califórnia (B), Modeling of Meander Channel Evolution – Nevada (C), Moscow Mountain - Idaho (D), Boulder Creek Critical Zone Observatory – Colorado (E) e New Madrid Seismic Zone - Arkansas/Missouri (F). Polígonos em vermelho representam as áreas com dados LiDAR. Fonte: US Census Bureau (A) e Dados cartográficos Google (B-F).

4.1.2 Boulder Creek Critical Zone Observatory – Colorado

Boulder Creek Critical Zone Observatory (CZO) está localizado na bacia hidrográfica de Boulder Creek, próximo a Boulder – Colorado. Os dados LiDAR foram adquiridos para 60.000 hectares por meio da parceria entre o Centro Nacional para Mapeamento a Laser Aerotransportado (do inglês, National Center for airborne Laser Mapping – NCALM) e o CZO, ambos financiados pela NSF. O projeto concentra-se na análise de como água, atmosfera, ecossistema e os solos se interagem e transformam a superfície da terra.

A nuvem de pontos LiDAR foi adquirida usando o mapeador de terreno a laser aerotransportado (do inglês, Airborne Laser Terrain Mapper - ALTM) Gemini, da Optech Inc, montado em um bimotor modelo Pipe PA-31 Chieftain com Unidade de Mensuração Inercial (IMU). O sobrevoo foi realizado entre os dias 21 e 26 de agosto de 2010 a uma altura de 600 metros e resultou em 7.355.678.903 retornos LiDAR (pontos), com uma densidade de 11,33 pontos/m². A acurácia horizontal é de 11 cm RMSE e a vertical de 5-30 cm RMSE, ambos a 1 sigma. A projeção cartográfica adotada é a Universe Transverse Mercator (UTM), zona 13N, com o North America Datum 1983 (NAD83) como datum horizontal e o North America Vertical Datum 1983 (NAVD88) como datum vertical.

Nessa área, selecionou-se 3 unidades amostrais de 200 x 200 m em área urbana, com diferente relação entre área construída e área verde com auxílio do Google Earth.

4.1.3 Modeling of Meander Channel Evolution – Nevada

Modeling of Meander Channel Evolution é um polígono retangular com área de 3.266,4 hectares localizado aproximadamente 200 km a nordeste de Reno, Nevada, e 85 km a noroeste da pequena cidade de Winnemucca, Nevada. A aquisição e processamento dos dados foram feitas pelo NCALM com financiamento da Divisão de Ciências da Terra da NSF. Os dados foram coletados para modelar a evolução da sedimentação dessa planície de inundação.

O levantamento de dados LiDAR foi realizado com um ALTM Gemini, da Optech Inc., montado em um bimotor modelo Piper PA-31. O sobrevoo foi realizado no dia 7 de agosto de 2010 a uma altitude de voo de 800 metros, do qual obteve-se 183.314.352 pontos a uma densidade de 4,06 pontos/m². A acurácia horizontal é de 15,5 cm RMSE e a vertical de 5-30 cm RMSE, ambos a 1 sigma. A projeção é a UTM, zona 11N, com NAD83 como datum horizontal e NADV88 como datum vertical.

As unidades amostrais nesse sítio foram escolhidas visualmente com uso do Google Earth. Foram três áreas de 200 x 200 m em diferentes pontos do relevo representando um ambiente com terreno exposto (desértico).

4.1.4 Moscow Mountain – Idaho

Moscow Mountain está localizada na região centro norte do estado de Idaho. Os dados LiDAR coletados cobrem uma área total de 32.708 hectares, onde encontra-se uma floresta mista de coníferas dividida entre florestas comerciais, privadas, estatal e federal. Trata-se de um grande projeto para aplicação de dados LiDAR no meio florestal promovido pela Estação de Pesquisa das Montanhas Rochosas do Serviço Florestal Americano (*United States Forest Service Rocky Mountain Research Station*), em parceria com o Consórcio LiDAR de Idaho (*Idaho LiDAR Consortium*) e a Universidade de Idaho (*University of Idaho*).

O sobrevoo foi realizado nos dias 13 e 14 de agosto de 2003 pela empresa Fugro Horizons. Usou-se o scanner a laser aerotransportado Leica ALS40 embarcado em uma aeronave modelo Cessna 310 a uma altitude de 2438 metros acima do nível médio do terreno. Como produto foram adquiridos 113.191.977 retornos LiDAR, com densidade de 0,35 pontos/m². O erro é inferior a 10,6 cm, tanto horizontalmente quanto verticalmente. Assim como no sítio anterior (tópico 3.1.3), a projeção é a UTM, zona 11N, e os datums são o NAD83 (horizontal) e NADV88 (vertical).

Após o download dos dados, procedeu-se a seleção visual das três áreas. Usou-se o histórico do Google Earth para identificar áreas com características diferentes em 2003, ano da coleta. Assim, a primeira com maior densidade de indivíduos arbóreos adultos, a segunda em estágio inicial de regeneração recobrando toda a área, e a terceira recém colhida, com apenas alguns indivíduos adultos deixados para trás. O relevo é ondulado nas três áreas, apresentando variação de 33, 26 e 35 m de altitude, respectivamente para as áreas 1, 2 e 3.

4.1.5 New Madrid Seismic Zone - Arkansas/Missouri

New Madrid Seismic Zone está localizada a sudeste do estado de Missouri e a nordeste do estado do Arkansas, com uma área total de 193.600 hectares dividida entre os dois estados. Os dados foram adquiridos pelo Departamento de Geologia e Indústrias

Minerais de Oregon (*Oregon Department of Geology and Mineral Industries - DOGAMI*) em parceria com o Consórcio LiDAR de Oregon (*Oregon LiDAR Consortium*), com fundos do Levantamento Geológico Americano (*U.S. Geological Survey - USGS*), que também foi responsável pela coordenação do projeto. O intuito deste foi o suporte de estudos ligados aos riscos de terremotos nessa zona sísmica.

O levantamento utilizou um sensor Leica ALS50 montado em uma aeronave modelo Partenavia P.38 e foi realizado entre os dias 30 de janeiro e 26 de fevereiro de 2012 pela empresa Watershed Science a uma altitude de 1300 metros acima do nível médio do terreno. Como produto foram adquiridos 17.165.130.273 retornos LiDAR, com densidade de 8,87 pontos/m². A acurácia relativa é de 1 cm a 1 sigma e a acurácia vertical fundamental é inferior a 12 cm a 1 sigma. A área de estudo de New Madrid cobre as zonas UTM 15 e 16. Porém, os dados foram entregues na zona UTM 15; datum horizontal NAD83 e vertical NAVD88.

As unidades amostrais foram escolhidas visualmente com uso do Google Earth. Foram três áreas de 200 x 200 m em diferentes pontos do relevo buscando representar variações na cobertura agrícola do local.

4.1.6 Sierra National Forest – California

A área de estudo inclui quatro sítios na Sierra National Forest com aproximadamente 500 hectares cada e está localizada a nordeste da cidade de Fresno, Califórnia. No entanto, para este estudo, escolheu-se apenas a área mais próxima a cidade de Fresno (21 km. A aquisição e processamento dos dados foi feito pela NCALM com fundos da Divisão de Ciências da Terra da NSF. Os dados foram coletados para investigar a formação e transporte de solo na parte sul da Sierra Nevada.

O levantamento foi conduzido em um sensor Optech 1233 montado em um bimotor modelo Pipe Chieftain nos dias 26 e 27 de agosto de 2005 a uma altitude de 600 metros. Como produto foram adquiridos 111.007.052 retornos LiDAR, com densidade de 2,22 pontos/m². Não foi encontrado dados de acurácia horizontal e vertical no relatório de processamento desses dados. O sistema de coordenadas é a UTM z11N NAD83, com NADV88 como datum vertical de referência.

As unidades amostrais foram escolhidas visualmente com uso do Google Earth. Foram três áreas de 200 x 200 m, 200 x 300 m e 200 x 200 m - respectivamente para as UAs 1, 2 e 3 - em diferentes pontos do relevo buscando representar variações na cobertura arbustiva do local. A UA com 6000 m² teve esse tamanho devido a um erro na definição do Xmax, que só foi verificado no final das análises, mas como a área é a mesma para os três tratamentos (fusion, lastools e MCC), ela foi mantida. Não estava sendo possível executar a filtragem no MCC para a terceira UA, por isso ela foi expandida para 16000 m² (400 x 400 m), com o aumento da área esse problema foi resolvido. Em seguida, esta área foi recortada no tamanho original usando a ferramenta *Extract by Mask* (extrair pela máscara), do ArcGis 10.2. O MDT gerado pelo algoritmo implementado na ferramenta do fusion para esta área foi usado como máscara para este recorte.

4.2 Geração dos MDTs

Em posse dos dados LiDAR dos cinco sítios, o primeiro passo foi recortar as áreas de interesse em cada sítio usando a ferramenta *clipdata*, do programa Fusion. Em seguida, realizou-se a filtragem dos pontos representantes do terreno nú com cada ferramenta: *Groundfilter* (Fusion), *LASground* (LAStools) e *MCCfilter* (MCC). Uma vez que o objeto de

comparação eram os algoritmos de filtragem dos pontos de superfície de terreno, fixou-se os demais algoritmos usados na geração do MDT. Nesse sentido, optou-se pelos algoritmos do pacote Fusion para criar os arquivos no formato .DTM a partir dos dados LiDAR filtrados e para sua subsequente conversão para o formato .ASCII. Estes foram os presentes nas ferramentas *GridSurfaceCreate* e o *DTM2ASCII*, respectivamente.

4.2.1 Recorte das áreas de interesse

A linha de comando *ClipData*, do FUSION-LTK (FUSION LIDAR Toolkit), foi usada para recortar cada uma das três áreas amostrais de 4.000 m² em cada região (com exceção da segunda e terceira unidades na região de vegetação arbustiva que possuem, respectivamente, 6.000m² e 16.000 m²), totalizando 15 áreas amostrais (Figura 3). Esse comando usa as coordenadas dos pontos mínimo (vértice inferior esquerdo) e máximo (vértice superior direito) da área para “clipar” a subamostra dos dados (Tabela 2). Segue sua sintaxe:

ClipData [switches] InputSpecifier SampleFile [MinX MinY MaxX MaxY]

InputSpecifier Endereço do arquivo de dados LiDAR usado pela linha de comando.
SampleFile Nome do arquivo da área no formato adicionado (nesse caso, formato .LAS)
MinX MinY Coordenadas X e Y do canto esquerdo inferior da amostra de dados LiDAR.
MaxX MaxY Coordenadas X e Y do canto direito superior da amostra de dados LiDAR.
Switches Não foi utilizado nenhum switch.

As 15 linhas de comando foram salvas no programa NOTEPAD++, em um arquivo na extensão .BAT. Dessa forma, elas eram executadas por meio do programa Fusion no ambiente do *Sistema Operacional em Disco* (MS-DOS), sendo enviadas para execução diretamente pelo notepad++ (ou seja, não havia a necessidade de abrir o MS-DOS e digitar ou copiar e colar cada linha de comando para poder executá-la).

Tabela 2 Coordenadas geográfica dos pontos inferior esquerdo (Xmin, Ymin) e superior direito (Xmax, Ymax) para cada unidade amostral (UA), nos cinco sítios de dados LiDAR.

Região	Sist.	Coordenadas	UA	Xmax	Ymax	Xmin	Ymin
Boulder Creek Critical Zone Observatory/ CO	UTM		1	475222.62	4429290.73	475422.62	4429490.73
	z13	N	2	475685.84	4429550.40	475885.84	4429750.40
	NAD83		3	475129.03	4429641.00	475329.03	4429841.00
Modeling of Meander Channel Evolution/NV	UTM		1	354282.77	4560480.26	354482.77	4560680.26
	z11	N	2	348436.71	4556498.45	348636.71	4556698.45
	NAD83		3	475222.62	4429290.73	475422.62	4429490.73
Moscow Mountain/ ID	UTM		1	521133.01	5189858.17	521333.01	5189858.17
	z11	N	2	522119.18	5190310.23	522319.18	5190510.23
	NAD83		3	522069.64	5186669.93	522269.64	5186869.93
New Madrid Seismic Zone/AR/MO	UTM		1	242415.13	3989760.77	242615.13	3989960.77
	z15	N	2	241551.80	3988449.06	241751.80	3988649.06
	WGS84		3	241855.26	3988363.06	242055.26	3988563.06
Sierra Forest/CA	UTM		1	265152.30	4092727.08	265352.30	4092727.08
	z11	N	2	264894.20	4094729.70	265194.20	4094929.70
	NAD83		3	265467.54	4094367.29	265867.54	4094767.29

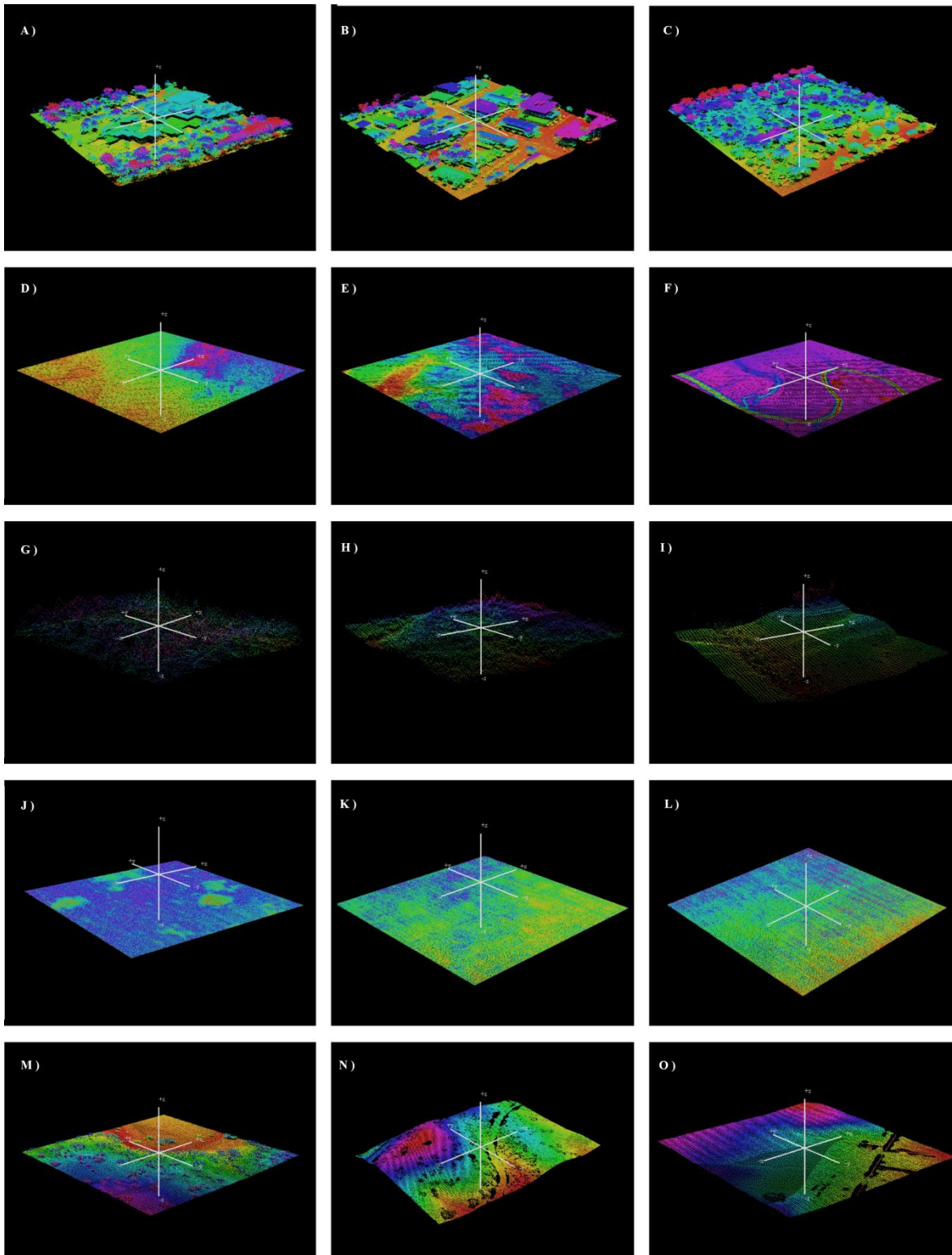


Figura 3 Unidades amostrais isoladamente após o recorte feito pela linha de comando clipdata (Fusion). UAs no ambiente: Urbano em Boulder Creek Critical Zone Observatory, CO (A, B e C); desértico em Modeling of Meander Channel Evolution, NV (D, E e F); florestal em Moscow Mountain, ID (G, H e I); agrícola em New Madrid Seismic Zone, AR/MO (J,K e L) e arbustivo em Sierra National Forest, CA (M, N e O). A visualização dos dados foi feita no programa PointVue LE.

4.2.2 FUSION/LDV

Foram utilizados três algoritmos incorporados ao software Fusion. O primeiro, objeto de estudo deste trabalho, é o algoritmo de filtragem contido na ferramenta *Groundfilter*. Os outros dois foram usados para conversão dos dados de terreno extraídos da nuvem de pontos no formato .LAS para MDTs no formato .DTM – *GridSurfaceCreate* – e posterior conversão para o formato .ASCII – *DTM2ASC*.

4.2.2.1 Filtragem

O primeiro algoritmo para filtragem dos pontos representantes do terreno nas 15 UAs foi o implementado no *Groundfilter*, do Fusion. O tamanho da célula escolhido foi 7 metros, switches não foram utilizados nesse estudo. Sua sintaxe é dada a seguir:

```
C:\FUSION\groundfilter.exe
C:\LiDAR_Processing\02_processing\00_Fusion\00_Forest\Forest_ground_fusion_1.las    7
C:\LiDAR_Processing\01_data\00_forest\Forest_clipped.las
```

GroundFilter [*switches*] *outputfile* *cellsize* *datafile1* *datafile2* ...

<i>outputfile</i>	Nome do arquivo de saída contendo os pontos classificados como terreno nu.
<i>cellsize</i>	Tamanho da célula usada para modelos de superfície intermediários (ele não é o tamanho final das células dos modelos de terreno criados usando o <i>GridSurfaceCreate</i> ou <i>TINSurfaceCreate</i>).
<i>datafile1</i>	Primeiro arquivo LiDAR de entrada (que pode ser nos formatos LDA, LAS, ASCII, LIDARDAT). Também pode ser um ‘curinga’ (wildcard) ou arquivo de texto com a lista completa de arquivos a serem processados. Quando a wildcard ou arquivo de texto é usado, nenhum outro parâmetro <i>datafile#</i> é reconhecido.
<i>datafile2</i>	Segundo arquivo de dados LiDAR. Vários arquivos podem ser especificados. O limite depende do tamanho do nome de cada arquivo. Um wildcard ou um arquivo de texto são recomendados para serem usados no <i>datafile1</i> quando se tratar de múltiplos arquivos.
<i>switches</i>	Não foram utilizadas switches. Uma série de switches podem ser encontrados em (McGaughey, 2012).

4.2.2.2 Criação dos MDTs e conversão para o formato ASCII

Para concluir a geração dos MDTs foram utilizados os algoritmos *GridSurfaceCreate* e *DTM2ASCII*, ambos algoritmos pertencentes ao Fusion. Estes foram também utilizados para gerar os MDTs a partir dos dados LiDAR filtrados pelo *LASground* e *MCCfilter* para fins de padronização e análise exclusiva do comportamento dos filtros.

GridSurfaceCreate cria um modelo de superfície em rede usando pontos aleatórios. O modelo é armazenado no formato DTM usando valores de elevação (flutuantes). O valor da célula é calculado usando a média da elevação de todos os pontos no seu interior. Foram gerados MDTs com 1 x 1 m de resolução espacial. A sintaxe deste é apresentada a seguir:

```
C:\FUSION\GridSurfaceCreate /lasclass:2
C:\LiDAR_Processing\02_processing\01_Lastools\04_Shrib\Shrib_lasground_1.dtm 1 M M
1 0 0 0
C:\LiDAR_Processing\02_processing\01_Lastools\04_Shrib\Shrib_ground_lasground_1.las
```

GridSurfaceCreate [*switches*] *surfacefile* *cellsize* *xyunits* *zunits* *coordsys* *zone* *horizdatum* *vertdatum* *datafile1* *datafile2* ...

<i>Surfacefile</i>	Nome do arquivo de superfície de saída a ser armazenado no formato PLANS DTM com a extensão .dtm.
<i>cellsize</i>	Tamanho da célula para a superfície.
<i>xyunits</i>	Unidades XY para os dados LiDAR. Utilizou-se M (metros).
<i>zunits</i>	Unidade para a elevação dos dados LiDAR. Utilizou-se M (metros).
<i>coordsys</i>	Sistema de coordenadas para a superfície. Em todos os casos utilizou-se o valor 0 (desconhecido).
<i>zone</i>	Coordinate system zone para a superfície (0 para desconhecida).
<i>horizdatum</i>	Datum horizontal para a superfície. Em todos os casos utilizou-se 0 (desconhecido).
<i>vertdatum</i>	Datum vertical para a superfície. Em todos os casos utilizou-se o valor 0 (desconhecido).
<i>datafile1</i>	Primeiro arquivo LiDAR de entrada (que pode ser nos formatos LDA, LAS, ASCII, LIDARDAT). Também pode ser um ‘curinga’ (wildcard) ou arquivo de texto com a lista completa de arquivos a serem processados. Quando a wildcard ou arquivo de texto é usado, nenhum outro parâmetro <i>datafile#</i> é reconhecido.
<i>datafile2</i>	Segundo arquivo de dados LiDAR. Vários arquivos podem ser especificados. O limite depende do tamanho do nome de cada arquivo. Um wildcard ou um arquivo de texto são recomendados para serem usados no <i>datafile1</i> quando se tratar de múltiplos arquivos.
<i>switches</i>	Não foram utilizadas switches. Uma série de switches podem ser encontrados em (McGaughey, 2012).

DTM2ASC converte os dados armazenados no formato PLANS DTM para arquivos no formato raster ASCII. Este formato pode ser importado em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como o ArcInfo. Sua sintaxe é apresentada a seguir:

```
C:\FUSION\dtm2ascii
C:\LiDAR_Processing\02_processing\01_Lastools\04_Shrib\Shrib_lasground_1.dtm
```

DTM2ASCII [*switches*] *inputfile* [*outputfile*]

<i>inputfile</i>	Nome do arquivo PLANS DTM a ser convertido para o formato ASCII.
<i>outputfile</i>	Nome para o arquivo convertido. Se este estiver omitido, o nome do arquivo de saída será formado pelo nome do arquivo de entrada com a extensão .asc.

switches Não foram utilizadas switches. A descrição das switches *csv* e *raster* podem ser encontradas em (McGaughey, 2012).

4.2.3 LAStools

O segundo filtro utilizado nas 15 UAs foi o LASground, do LAStools. Foi utilizada a configuração padrão, ou seja, não foram estabelecidos valores para os parâmetros *offset*, *spike*, *step* e *standard deviation* (desvio padrão). Em seguida, procedeu-se a geração dos MDTs e posterior conversão para o formato .ASC como descrito no item 3.2.2.2. A sintaxe de sua linha de comando é dada a seguir:

```
C:\lastools\bin\lasground -i C:\LiDAR_Processing\01_data\04_shrub\Shrub_clipped.las -o  
C:\LiDAR_Processing\02_processing\01_Lastools\04_Shrub\Shrub_ground_lasground_1.las
```

lasground -i input_file -o output_file -offset_value -spike_value -step_value -stdv_value

<i>-i the_input_las_file</i>	Arquivo de entrada no formato .LAS ou LDA
<i>-o the_output_las_file</i>	Arquivo de saída no formato .LAS ou LDA
<i>-offset_value</i>	Indica até que nível os pontos acima do terreno atual é incluído.
<i>-spike_value</i>	Remove pontas acima ou abaixo em TIN grosseiros. Para spike de 0.5 (metros), por exemplo, serrão removidos pontas positivas acima de 50 centímetros e pontas negativas abaixo de 5 metros.
<i>-step_value</i>	Refere-se ao tamanho da escala. Para áreas florestais, 5 metros produz bom resultado, mas pequenas cidades ou terrenos planos recomenda-se aumentar para 10 m, para cidades usa-se 25 m e assim por diante.
<i>-stdv_value</i>	Estabelece o desvio padrão máximo para manchas planas, em centímetros.

4.2.4 MCC

Finalizando esta etapa, as 15 UAs nos cinco ambientes foram filtrados utilizando o algoritmo *MCC filter*. Fixou-se os valores 1,5 e 0,3 como, respectivamente, os parâmetros escala (λ) e tolerância da curvatura (t) para todos os ambientes. Em seguida, procedeu-se a geração dos MDTs e posterior conversão para o formato .ASC como descrito no item 3.2.2.2. A sintaxe de sua linha de comando é dada a seguir:

```
C:\MCC_LIDAR_2.1\bin\mcc-LiDAR.exe -s 1.5 -t 0.3  
C:\LiDAR_Processing\01_data\04_shrub\Shrub_clipped03.las  
C:\LiDAR_Processing\02_processing\03_MCC\04_Shrub\03_Shrub_MCC_ground_1.5_0.3.l  
as
```

mcc-LiDAR -s value -t value the_input_las_file the_output_las_file

<i>-s value</i>	Parâmetro λ definido pelo usuário para a primeira escala de domínio
<i>-t value</i>	Parâmetro t definido pelo usuário para a primeira escala de domínio
<i>the_input_las_file</i>	Arquivo de entrada no formato .LAS
<i>the_output_las_file</i>	Arquivo de saída no formato .LAS

4.3 Comparação dos modelos

Os MDTs gerados em cada ambiente foram importados no ArcGIS 10.2. no formato ASCII. O primeiro passo foi subtrair o modelo gerado por um algoritmo pelo gerado por cada um dos outros dois para cada área (por exemplo, para área urbana número 2 usou-se as expressões: $2_urban_fusion - 2_urban_lastools = 2_urban_fl$; $2_urban_MCC - 2_urban_fusion = 2_urban_mf$; $2_urban_MCC - 2_urban_lastools = 2_urban_ml$). Assim, foi possível comparar a diferença produzida pelos modelos. Esse procedimento foi realizado usando a ferramenta *raster calculator* (calculadora raster). O método de classificação dos produtos dessa operação foi o denominado *standard deviation* (desvio padrão), em *symbolology* (simbologia). A cor utilizada foi a *spectrum – full bright*. Ao produto de cada uma destas operações foi adicionado seu respectivo gráfico de dispersão dos erros de elevação obtido pela subtração da altitude proveniente da extração dos pontos por um algoritmo pela altitude proveniente da extração dos pontos por outro (ex.: elevações Fusion x Elevações Lastools). Em seguida, os modelos gerados para cada área, em formato .ASC, foram convertidos para o formato *Raster* usando a ferramenta *ASCII to Raster*. Estes, por sua vez, foram convertidos para pontos (formato shapefile) usando a ferramenta *Raster to Point*, unidos em uma única tabela de atributos usando a ferramenta *Spatial Join* e, finalmente, convertidos por meio da ferramenta *Table to Excel* para o formato .XLS, para posteriores análises. Esse processo foi realizado usando a ferramenta *ModelBuilder* a fim de construir um modelo que pudesse ser facilmente replicado para todas as 45 unidades amostrais (Figura 3). O ArcGIS 10.2 foi usado ainda para gerar todos os mapas referentes a este trabalho. As tabelas de atributos dos arquivos em formato *shapefile* foram utilizadas para gerar os histogramas para cada MDT. Adicionalmente, os MDTs provenientes de cada algoritmo foram visualizados tridimensionalmente no ArcScene 10.2. A união dos MDTs em 2D (ArcGIS 10.2), 3D (ArcScene 10.2), histogramas e dos arquivos em formato .LAS (com auxílio do visualizador FrugoViewer) permitiu analisar qualitativamente os produtos gerados por cada algoritmo.

Por meio desses processos foi possível observar a presença de erros do tipo I – associado à remoção de pontos pertencentes ao terreno – e, principalmente, tipo II – quando objetos são aceitos como parte do terreno – (SITHOLE & VOSSSELMAN, 2004) que representam *outliers*, ou seja, pontos muito acima ou abaixo da superfície do terreno nos MDTs gerados(SITHOLE & VOSSSELMAN, 2004).

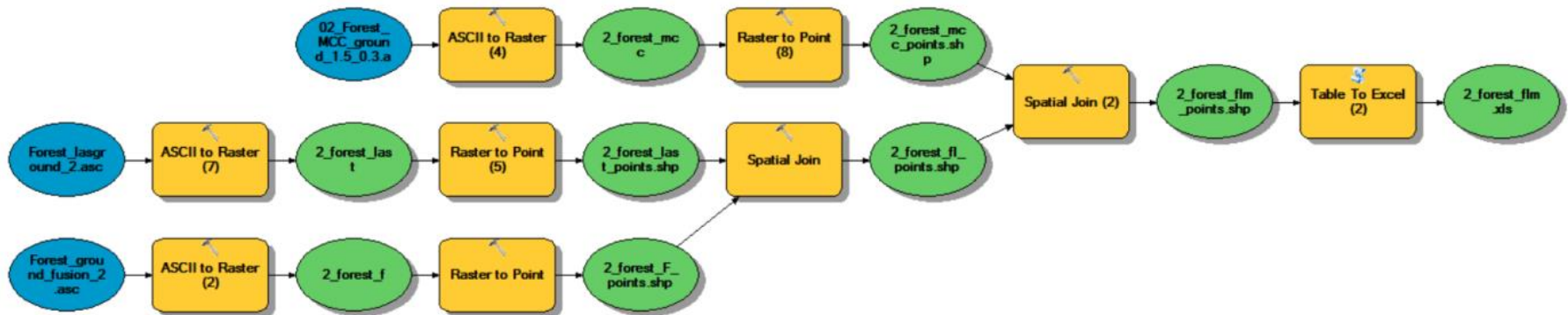


Figura 4 Modelo usado para converter os MDTs inicialmente no formato .ASC para planilhas de excel no formato .XLS. Modelo construido no ModelBuilder, ArcGIS 10.2.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Produtos gerados para cada cobertura do solo

A análise visual dos MDTs permitiu identificar *outliers* que variam de um algoritmo para outro. Eles podem ser identificados nos histogramas que acompanham os modelos gerados para cada área (Figuras 5, 7, 9, 11 e 13). Histogramas onde a frequência das elevações não estão visualmente aparentes em parte do eixo X, podem indicar a presença de *outliers*. Erros do tipo I e II foram encontrados nos produtos das extrações de pontos de terreno e podem estar associados ao relevo, tipo de cobertura, desidade de pontos e filtro utilizado.

Além disso, é apresentado a subtração do modelo gerado a partir da filtragem por um algoritmo pelo gerado a partir da filtragem por outro. Esse conjunto de figuras possui ainda o erro de elevação dos filtros obtido pela subtração mencionada anteriormente. Dessa forma é possível visualizar o erro distribuído pela área (visualização 2D dos erros) no mapa, bem como sua amplitude no gráfico (Figuras 6, 8, 10, 12 e 14).

Em função da indisponibilidade de dados de campo provenientes de GPS diferencial para determinação da acurácia dos MDTs gerados por cada filtro, estes foram comparados entre si. Valores de acurácia encontrados na literatura foram então utilizados para determinar se a diferença entre eles era significativa. Por outro lado, não pode-se afirmar se um algoritmo é mais ou menos acurado que o outro.

5.1.1 Ambiente urbano

Apesar de ser a área com maior densidade de pontos (11,33pts/m²), este ambiente apresentou erros notáveis que não podem ser aceitos em um MDT. Nesse ambiente, objetos que não constituem o terreno foram identificados como tal. Isso se deve, de fato, a complexidade da área que apresenta edificações de diferentes tamanhos. Edificações representam um grande desafio para filtragem decorrentes das superfícies relativamente grandes e planas dos telhados (McGaughey, 2012). Estas superfícies são dificilmente removidas e ficam evidentes nos MDTs. A solução para estes casos é a remoção manual dos pontos que as constituem. No entanto, a calibração dos parâmetros de cada algoritmo pode gerar melhores resultados (SITHOLE & VOSSSELMAN, 2004).

As três áreas de estudo neste ambiente são relativamente planas (2 – 9%) e apresentam diferenças no tamanho das edificações, onde a primeira área possui a maior edificação e a terceira apresenta as menores edificações (Figura 5). Na primeira área, como esperado, os três algoritmos não obtiveram sucesso em remover as edificações, com variações na altura de 15,86 m, 14,03 m e 18,31 m, respectivamente para os algoritmos do *Groundfilter*, *LAStools* e *MCCfilter* (Figura 5, itens a,b e c). Dos três, o algoritmo presente no *Groundfilter* apresentou o melhor desempenho, com menor concentração de pontos próximo ao limite superior do histograma de elevações, que indica a altura dos telhados, uma vez que esta é uma área plana e a amplitude da elevação chega a 15 metros, possível altura da edificação. Ainda assim, o resultado está longe de ser satisfatório e a remoção manual desses pontos se faz necessária (SITHOLE & VOSSSELMAN, 2004).

A terceira área teve suas edificações removidas com bastante êxito pelos três filtros (Figura 5, itens g, h e i). No entanto, os MDTs gerados pela ferramenta do Fusion e do MCC apresentaram valores de elevação muito inferiores aos encontrados no do LAStools (1588,66 m de elevação para o menor valor no Fusion e MCC, contra 1646,57 m no LAStools). Ao

investigar estes casos, notou-se que esses pontos realmente existem, mas que foram removidos pelo *LASground* e mantidos pelos outros dois. Em alguns casos, representavam pontos que atingiram o piso do porão das casas. Porém, especificamente para o menor valor (1588 m), possivelmente indica o fundo de um poço ou ainda alguma fratura ou fenda geológica que permitiu o avanço do pulso eletromagnético. Além disso, muitos dados LiDAR possuem pontos em elevação extremamente inferior aos seus vizinhos e que não são, necessariamente, objetos reais (HAUGERUD & HARDING, 2001). Este tipo de engano pode ser causada pelo espalhamento de fótons em um retorno laser, o que aumenta o tempo de um pulso laser retornar para a aeronave e, conseqüentemente, a distância calculada para este ponto, que passa a ter um valor de elevação abaixo dos pontos vizinhos a ele (EVANS & HUDAK, 2007). No entanto, este não foi o caso dos *outliers* negativos encontrados.

Para os objetivos de um MDT, o algoritmo contido no *LASground* gerou a melhor superfície para a terceira área, uma vez que removeu as edificações e também não apresentou *outliers* negativos. O algoritmo do *Groundfilter* também foi bem sucedido ao remover as edificações nessa área, mas manteve *outliers* negativos. Apesar desses *outliers* não serem úteis em MDTs e certamente seriam removidos, podem ser úteis para outros fins, quando associados a mapeamento de poços, cavernas, túneis, etc. O MCC apresentou um desempenho similar ao *Groundfilter* no que diz respeito aos *outliers* negativos, mas não foi capaz de remover todas as edificações que constituíram *outliers* positivos no modelo. Por esta razão, o MCC obteve o pior desempenho entre os três para esta área.

Os MDTs gerados para segunda área apresentaram características presentes nas outras duas áreas (Figura 5, itens d, e e f). Muitas casas não foram removidas, como na primeira área, bem como alguns pontos abaixo do nível do terreno também foram identificados, como no terceiro. Assim como ocorreu na primeira área, o *Groundfilter* se saiu um pouco melhor, principalmente por remover pontos na borda das edificações. Mas o resultado ainda é insuficiente para ser utilizado como um bom modelo do terreno.

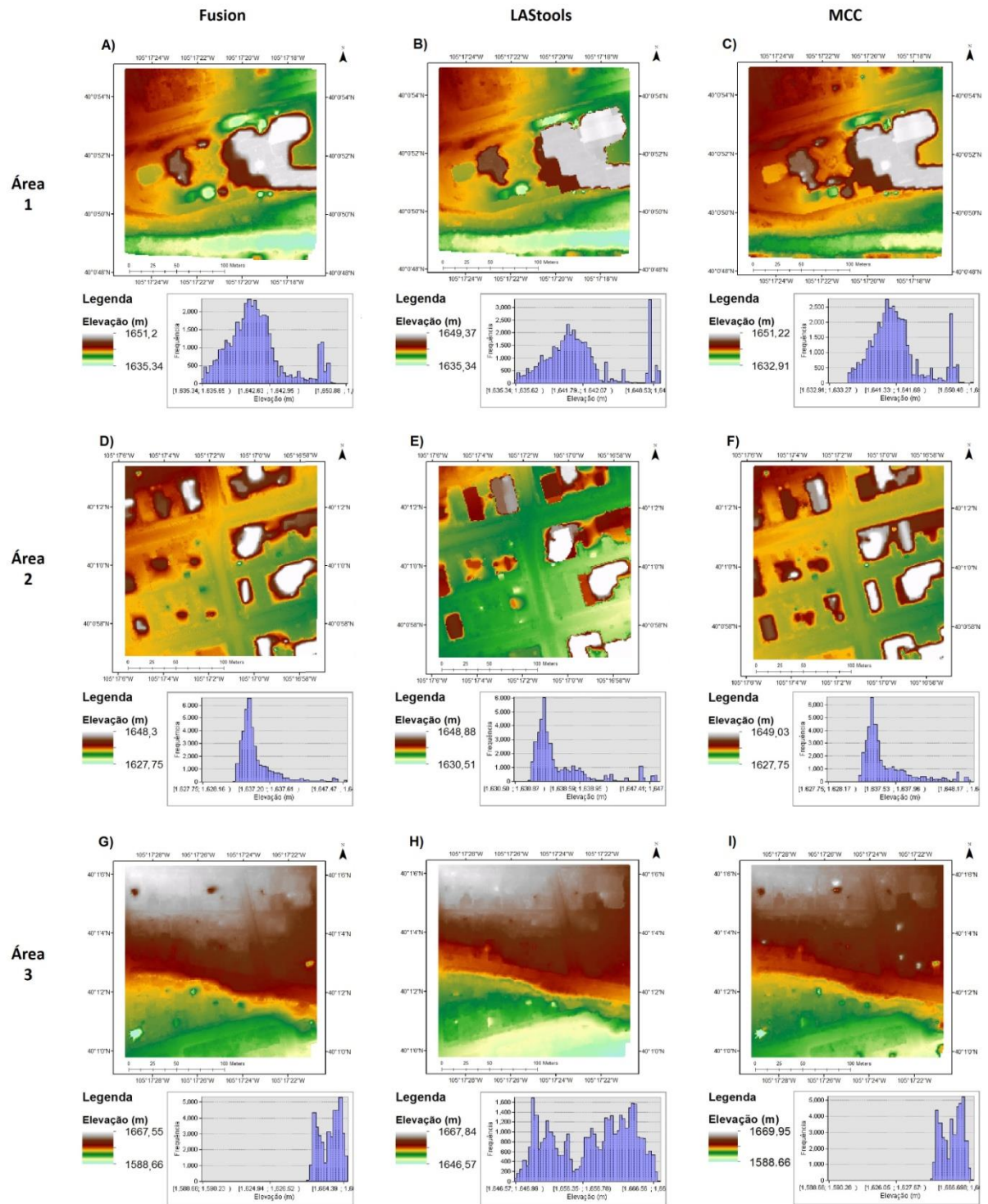


Figura 5 MDTs gerados para o ambiente urbano acompanhados dos seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados para as áreas 1, 2 e 3 pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i).

Quando subtraídos um MDT pelo outro, nota-se que a diferença está, principalmente, nas bordas das edificações para as áreas um e dois (Figura 6, itens a – f) e nas edificações como um todo na área três (Figura 6, itens g, h e i). Em relação ao *LASground*, o produto do *Groundfilter* apresentou menores valores de elevação nas bordas da edificação para a área um, atingindo quase 12 metros de diferença nas áreas mais críticas, fato que evidencia a característica de suavização de bordas desta configuração padrão do *Groundfilter*. Para a maior parte do terreno a diferença máxima alcança 86 cm. Este valor, apesar de submétrico, ainda é uma diferença bastante significativa na variação de elevação entre os algoritmos, podendo indicar ainda o efeito desse comportamento diferenciado entre os filtros na suavização das bordas. O modelo gerado a partir do MCC, por sua vez, apresenta valores de elevação menores que os apresentados pelo *LASground* e maiores do que os gerados pelo *Groundfilter*. As maiores diferenças também estão nas bordas da edificação, atingindo 12 metros (a menos), quando comparado ao modelo do *LASground*, e 8,78 metros (a mais), quando comparado ao do *Groundfilter*. Para a maior parte do terreno, a diferença máxima para ambos os produtos destas ferramentas foi de 54 cm.

Para a maior parte da segunda área, o algoritmo do *Groundfilter* gerou elevações atingindo 1,63 metros a menos que as geradas pelo Lastools. Nesta área, o MDT do *Groundfilter* apresentou elevações nos pontos críticos até 15,37 metros menores que as geradas pelo algoritmo do *LASground*, ao mesmo tempo que houveram pontos onde a elevação no modelo do *Groundfilter* foi até 11,3 metros maior. No geral, a diferença entre os modelos do MCC e do *LASground* alcançou 90 cm; já entre o MCC e o *Groundfilter* a diferença chegou a 1,43 metros para a maior parte desta área. Nos pontos mais críticos, a elevação no MCC apresentou valores atingindo 15,37 metros a menos em relação ao modelo do *LASground*, e 7,53 metros a menos em relação ao *Groundfilter*. Em outros pontos, os valores de elevação no MCC foram quase 15 metros maiores do que os encontrados nos MDTs do *LASground* e do *Groundfilter*.

Na terceira área, a diferença máxima entre o produto do *Groundfilter*. e o *LASground*, para a maior parte da área, foi de 55 cm, com *outliers* negativos atingindo 63 metros. O produto do *MCC Filter* foi até 46 cm menor para a maior parte do terreno, com *outliers* positivos e negativos. O maior *outlier* positivo alcança 8,1 metros e o negativo 63 metros. Em relação ao produto do *Groundfilter*., a diferença no geral chega a atingir 34 cm, com *outliers* positivos chegando a 10,4 metros.

Em suma, para o ambiente urbano, edificações tais como mansões, escolas, prédios e hospitais não são removidos pelos algoritmos nas configurações padrão usadas, carecendo de remoção manual dos pontos indesejáveis ao modelo. O mesmo foi identificado por SITHOLE & VOSSELMAN (2004) que, em um trabalho comparando oito algoritmos de filtragem, destacaram a impossibilidade da automatização completa desse processo, principalmente em áreas urbanas. Os filtros foram aceitáveis apenas para a área com edificações pequenas, como casas habitacionais. Nessa área, o melhor modelo foi produzido pelo algoritmo incorporado ao *LASground*, seguido pelo incorporado ao *Groundfilter*. A filtragem obtida pelo *Groundfilter*. e MCC permitiu identificar estruturas subterrâneas inesperadas, o que pode ser um resultado interessante dependendo do objeto de estudo. A ocorrência desse tipo de fenômeno no *LASground* não é esperada pois um dos parâmetros – *spike* – remove *outlier* negativos. Os melhores resultados podem ser alcançados com o *LASground* utilizando as estratégias predefinidas *metropolis*, *city or warehouses* e *town or flats* respectivamente para as áreas um, dois e três. Para o *Groundfilter* e *MCC filter* o recomenda-se a realização de testes variando os parâmetros destas ferramentas.

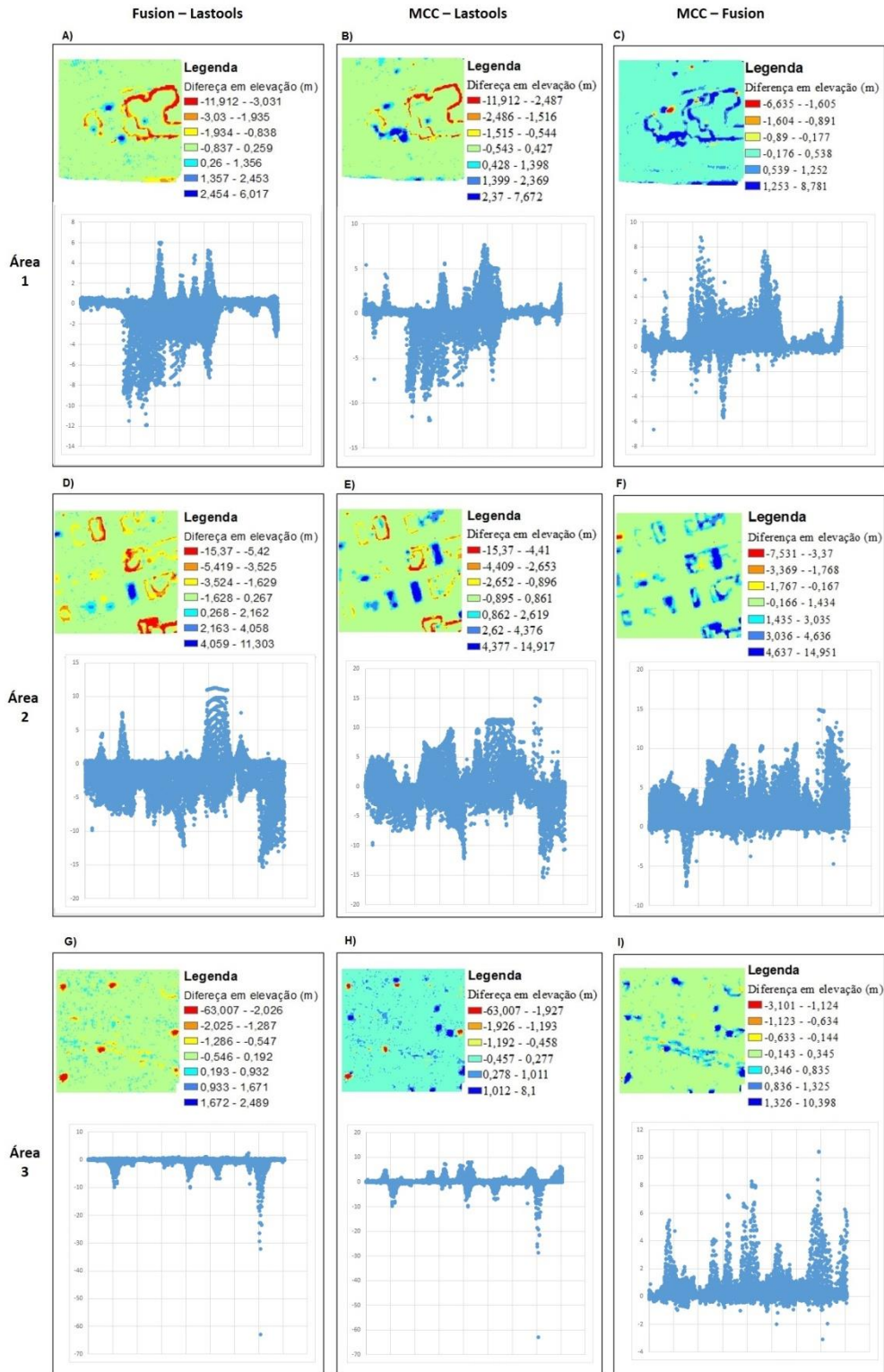


Figura 6 Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente urbano. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g), MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i).

5.1.2 Ambiente desértico

Os filtros não apresentaram diferença visual para nenhuma das três áreas no ambiente desértico (Figura 7). Uma vez que este é um ambiente onde não se espera encontrar nenhum tipo de cobertura sobre o terreno, todos os pontos tendem a atingi-lo. Logo, este era um resultado esperado. Além disso, a densidade de 4,06 pts/m² se mostrou satisfatória para geração dos modelos nessas condições.

As três áreas são planas, com variação submétrica na altitude da primeira área e pouco superiores a dois metros nas duas áreas seguintes. Os limites de altitude inferior e superior nas duas primeiras áreas foram os mesmos, independentemente do algoritmo. Na terceira área houve uma diferença de 17 cm entre o limite superior do modelo gerado pelo algoritmo implementado no *Groundfilter* para os outros dois. A similaridade entre os modelos gerados também pode ser observado nos histogramas, que apresentam os mesmos comportamentos. Adicionalmente, observa-se na terceira área que, diferentemente dos outros dois algoritmos, o usado pelo *GroundFilter* busca suavizar regiões onde a mudança de altitude é um pouco mais brusca, como nas bordas da drenagem principal que corta esta área. Enquanto há uma transição mais abrupta do tom avermelhado para o azul claro na borda desse dreno para os modelos provenientes das ferramentas do LAStools e do MCC, no modelo gerado pela ferramenta do Fusion, a transição é mais gradual pelo intermédio das cores verde e amarelo entre as outras duas cores que marcam o ponto mais alto e mais baixo no local. Similarmente, Kraus e Pfeifer (1998) relatam a criação de depressões artificiais e a ausência de quebras naturais em vales para MDTs gerados a partir da filtragem dos pontos LiDAR pelo algoritmo implementado no *Groundfilter*.

Ao se subtrair um modelo pelo outro a diferença foi inferior a 1,5 cm independentemente da operação para todas as operações (Fusion – Lastools, MCC – Lastools e MCC – Fusion) para a área um (Figura 8, itens a, b e c) e inferior a 40 cm para a área 2 (Figura 8, itens d, e e f). Como pode ser visto pelos mapas de diferença e nos seus respectivos gráficos de dispersão, são muito pouco os pontos diferentes entre os modelos para estas duas áreas, dentre os mais de 40.000 pontos presentes em cada área (40.000 m² com resolução 1x1 = ~40.000 pontos de elevação). A diferença na terceira área foi um pouco maior do que a observada nas outras duas, alcançando valores próximos a 1 m quando o modelo gerado pela ferramenta do Fusion é comparado as outras duas e quase 80 centímetros para os maiores valores de diferença entre o modelo gerado pela ferramenta do MCC em relação ao do Lastools. Esta diferença encontra-se, principalmente, nas margens da drenagem natural que corta esta área, locais onde o modelo gerado pelo algoritmo implementado no *Groundfilter* possui menores valores de elevação.

Dessa forma, modelos de qualidade podem ser gerados usando qualquer um dos filtros para este ambiente. Deve-se apenas atentar-se para a possível perda de informação em áreas com transição repentina de altitude como chapadas, encostas, taludes e canyons para modelos gerados a partir de dados filtrados com a algoritmo implementado no *groundfilter*.

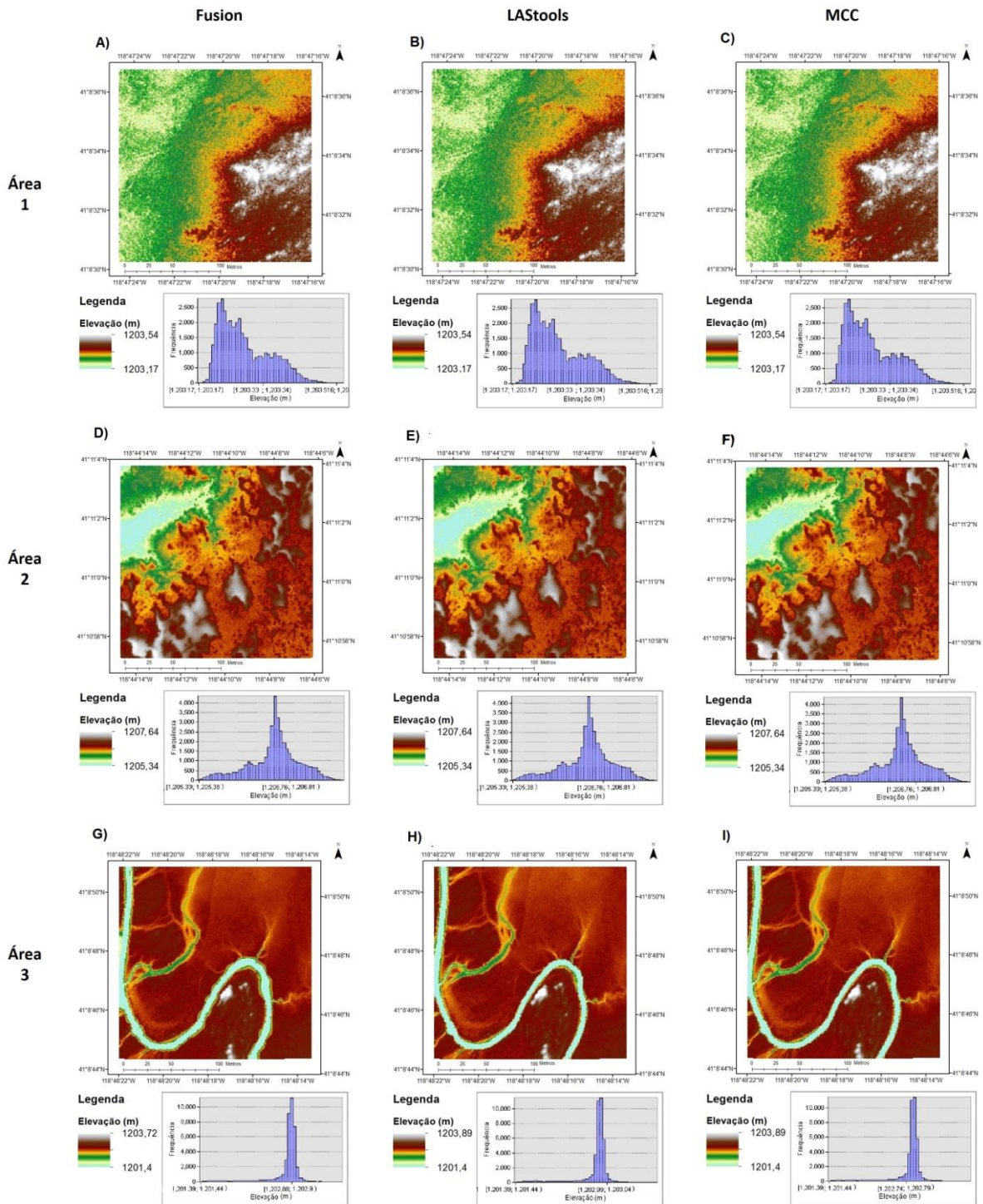


Figura 7 MDTs gerados para o ambiente desértico acompanhados dos seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados para as áreas 1, 2 e 3 pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i).

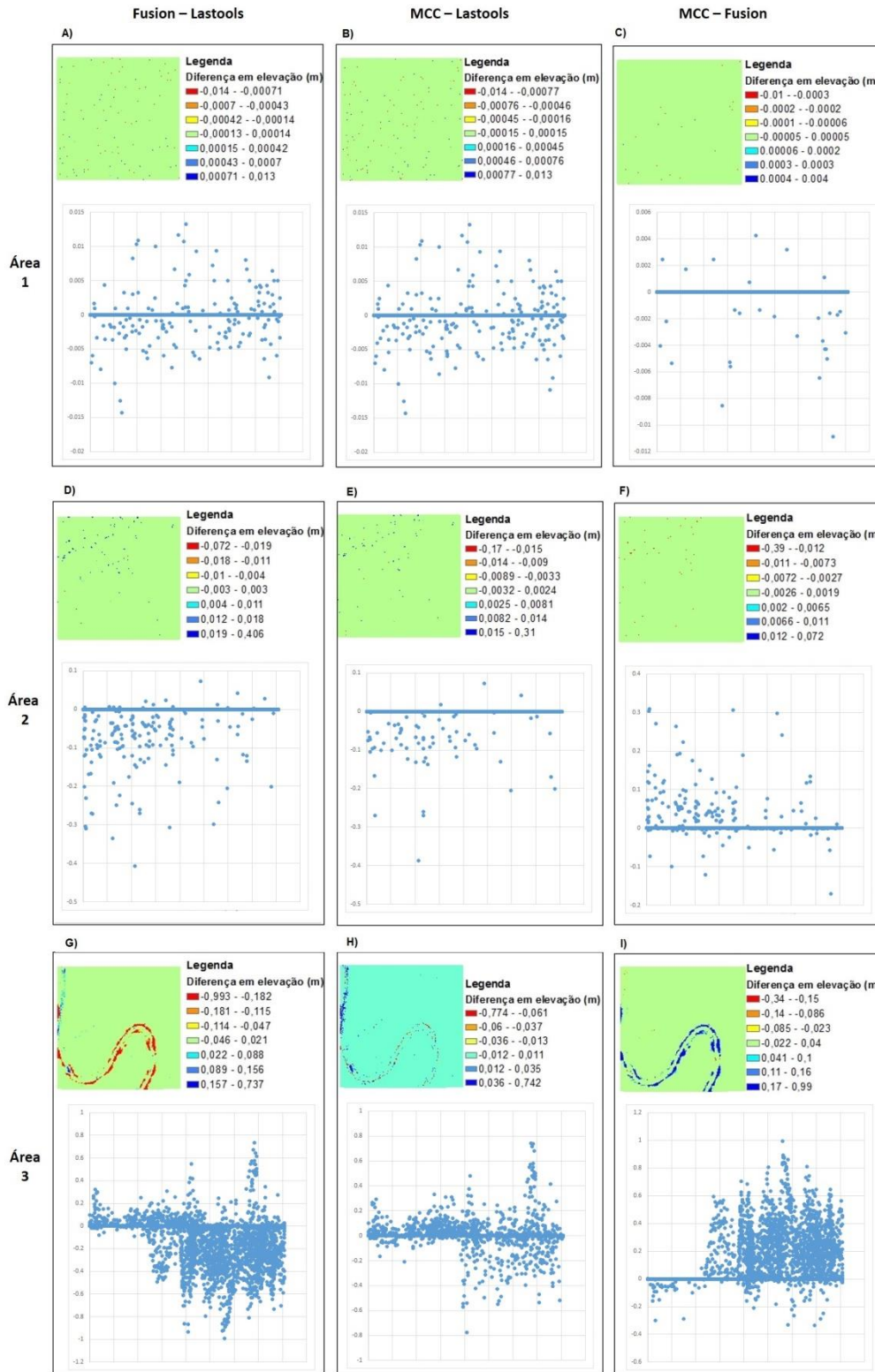


Figura 8 Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente desértico. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g), MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i).

5.1.3 Ambiente florestal

As áreas um e dois desse ambiente apresentaram pequenos *outliers* ao longo do terreno para todos os algoritmos testados, não havendo um filtro que se destacasse visualmente (Figura 9, itens a – f). Apesar de um número considerável de pontos ter atingido a superfície do terreno, a baixa densidade de pontos pode ter induzido os filtros a manter alguns pontos que não constituem o terreno propriamente dito. Esse resultado vai de encontro ao estabelecido por McGaughey (2012) no Manual Fusion, onde os coeficientes definidos como padrão para o algoritmo implementado no *GroundFilter* podem não gerar bons resultados para áreas com baixa densidade de pontos ($<4\text{pts/m}^2$), o mesmo foi identificado para os implementados no *LASground* e no *MCCground*. Os MDTs gerados pelas ferramentas do Fusion e do *LAStools* para a terceira área não apresentaram *outliers* (Figura 9, itens g e h) e o gerado pelo MCC teve apenas um *outlier* mais significativo (Figura 9, item i). Logo, mesmo com a baixa densidade de pontos, uma quantidade suficiente chegou à superfície do terreno e as poucas árvores remanescentes foram removidas com sucesso.

No que diz respeito à subtração de um modelo pelo outro, em boa parte da primeira área a diferença entre os modelos ficou entre -10 e 5 cm (Fusion – *lastools*), -8 e 24 cm (MCC – *Lastools*) e -5 e 24 (MCC – Fusion) (Figura 10, itens a,b e c). *Outliers* (positivos) no modelo gerado a partir de um ou outro algoritmo produziu diferenças que variaram entre -2,88 a 2,7 metros, quando o MDT gerado a partir do algoritmo implementado no *groundfilter* foi subtraído do gerado pelo implementado no *LASground*; -2,64 a 5,14 metros, quando o modelo produzido pelo *MCC filter* foi subtraído do produzido pelo *LASground*, e um intervalo próximo a este último (-2,8m – 5,09m), proveniente da diferença entre o modelo do *MCC filter* e o do *groundfilter*. Similarmente à primeira área, para maior parte da segunda área a diferença entre os modelos foi pequena, estando entre -33 e 8,5 (Fusion – *lastools*), -26 e 9 cm (MCC – *Lastools*) e -14 e 19 m (MCC – Fusion) (Figura 10, itens d, e e f). O picos foram de -5,8 e 3,65 para a subtração entre os produtos da filtragem pelas ferramentas do Fusion e do *Lastools*, -5,6 e 4,9 m para MCC e *Lastools* e -3,9 e 5 m para MCC e Fusion. A última área neste ambiente apresentou aproximadamente 25 cm para mais ou para menos como diferença padrão nas três comparações para a maior parte deste terreno. A diferença nos pontos críticos ficou entre -2,4 e 0,9 m para a comparação entre os algoritmos implementados nas ferramentas do Fusion e do *Lastools*, -2,4 e 3,2 m para MCC e *Lastools* e -0,9 e 3,2 m para MCC e Fusion. Desconsiderando o efeito dos *outliers*, a diferença entre os modelos está próximo ao encontrado por Evans & Hudak (2007) para modelos digitais de elevação (DEMs) derivados da interpolação de dados LiDAR em área florestal filtrados com auxílio do algoritmo que compõe o MCC. Esses autores encontraram erro médio quadrático (RMSE) de 0,76 e 0,41 m, respectivamente para DEMs em sítios com florestas densa e transicional. Kraus e Pfeifer (1998), por sua vez, encontraram RMSE equivalente a 0,57 m usando o algoritmo incorporado por McGaughey (2014) ao Fusion. Já o erro médio encontrado por Reutebuch et al. (2003) na geração de MDTs utilizando dados LiDAR previamente filtrados foi de 0,22 m, com desvio padrão de 0,24m e 0,32 m de RMSE.

Mesmo para as duas primeiras áreas, o modelo 2D é de alta qualidade e os *outliers* não interferem na análise da paisagem, mas este pode ser melhorado se o interesse é utilizar o modelo 3D. Para grandes áreas, onde esses modelos geralmente se aplicam, os *outliers* podem não ser notados, pois referem-se à vegetação de pequeno porte (regeneração). A solução seria testar outras configurações nos parâmetros dessas ferramentas ou fazer a remoção manual dos *outliers*, quando estes forem em pequeno número e/ou localizados. O *LASground* possui um parâmetro predefinido – *forest or hills* - que pode gerar melhores resultados para este caso. Os

dados para este ambiente possuem baixíssima densidade de pontos (0,34 pts/m²), o que pode ter influenciado na qualidade dos produtos gerados. De modo geral, quatro ou menos pontos por metro quadrado é considerado baixa densidade de pontos (MCGAUGHEY, 2013). Na Floresta Estadual do Antimary, no estado do Acre, há áreas com 25 pts/m² (D'OLIVEIRA, 2012), em função da alta densidade do subosque em florestas tropicais.

O modelo da superfície do terreno gerado a partir dos dados filtrados é inserido em diversos outros algoritmos para análise da estrutura vertical da floresta. Logo, se faz muito importante uma filtragem que produza modelos com o mínimo de *outliers* possível.

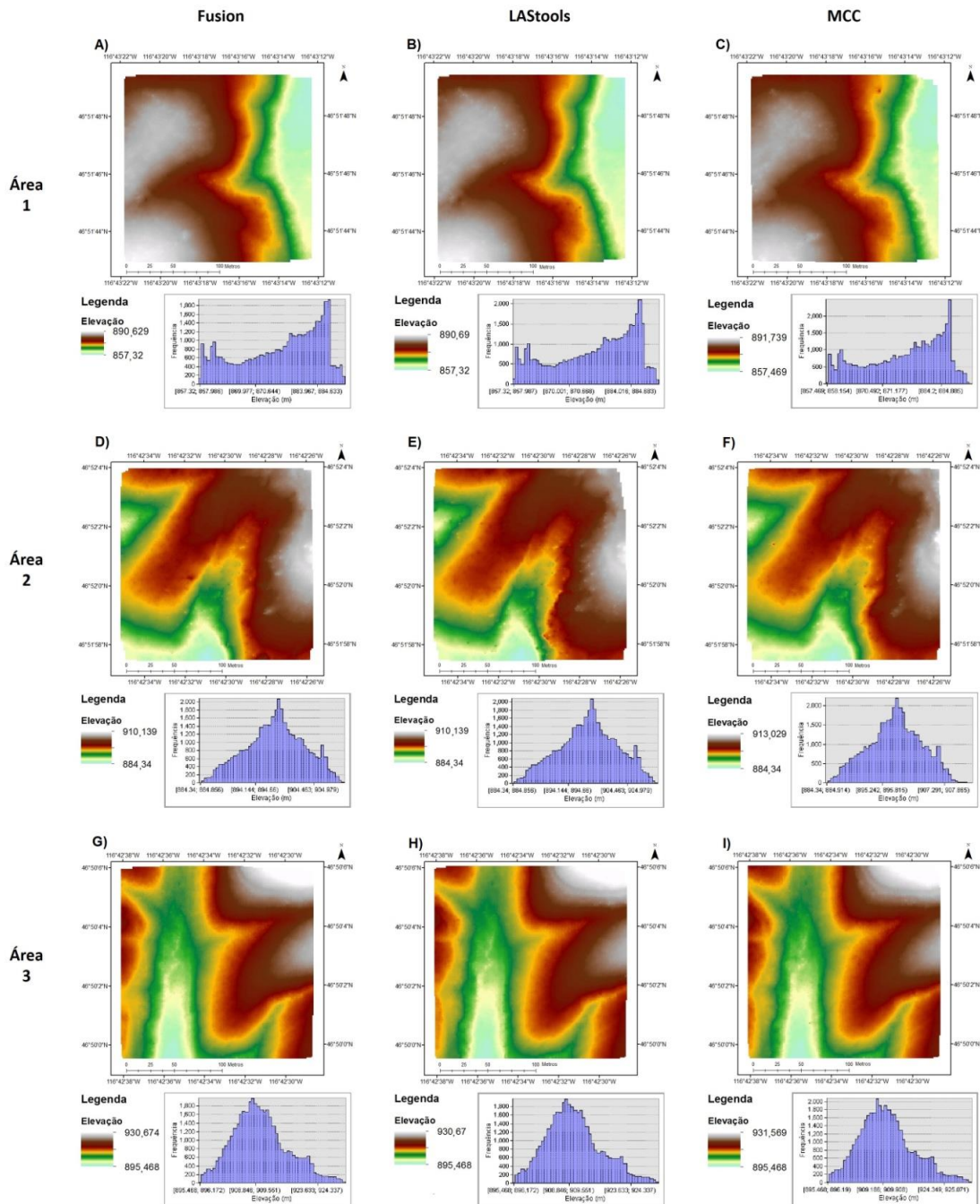


Figura 9 MDTs gerados para o ambiente florestal acompanhados dos seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados para as áreas 1, 2 e 3 pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i).

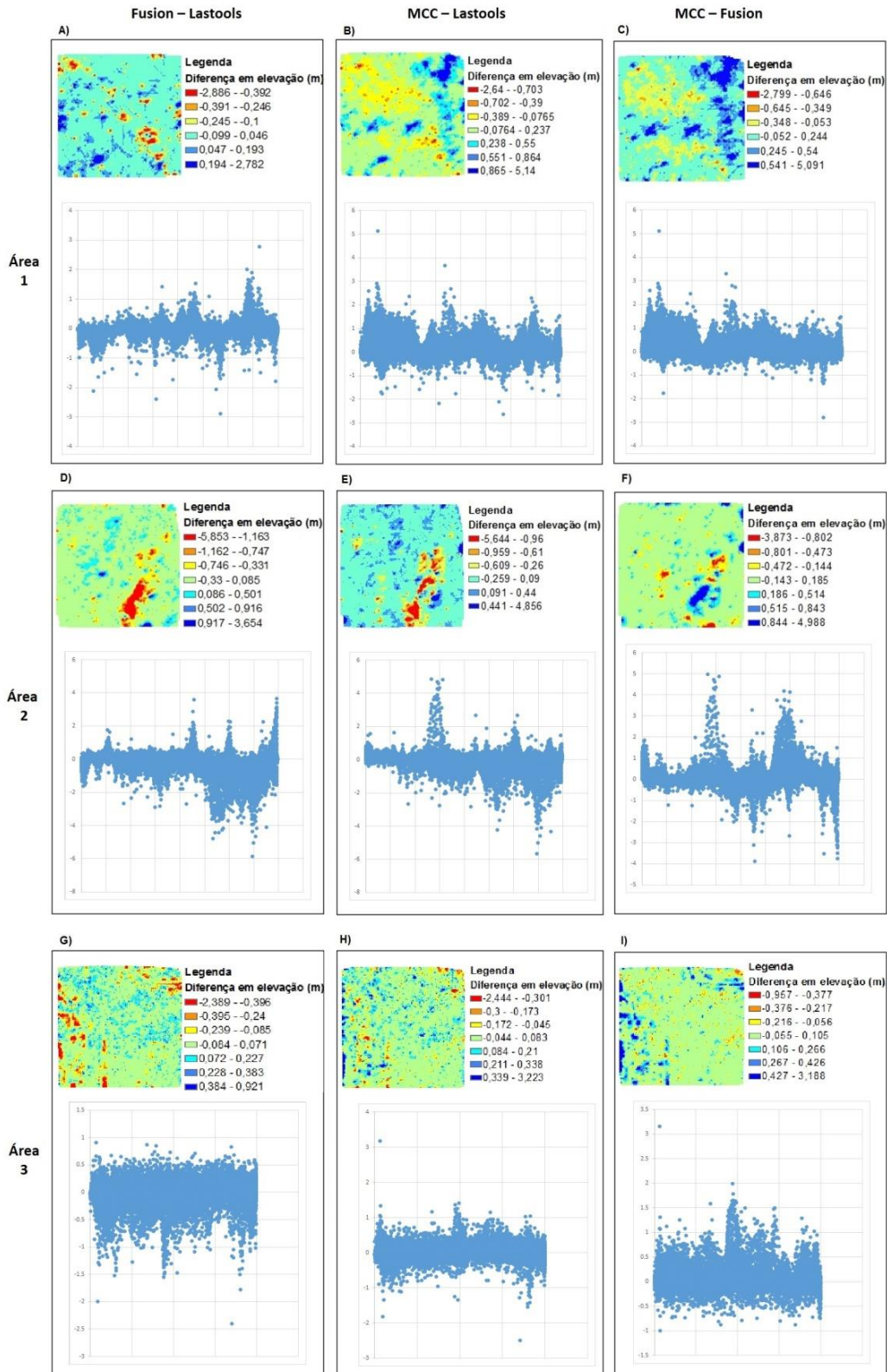


Figura 10 Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente florestal. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g), MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i).

5.1.4 Ambiente agrícola

A variação do relevo para as três áreas de 200 x 200 m de agricultura é submétrica e a altura da vegetação em si também é pequena, possivelmente se tratando de trigo ou cultura similar. A densidade de pontos é de 8,87 pts/m². A variação de cor um tanto brusca para os MDTs nesse ambiente é fruto das características do relevo e da resolução espacial, que fez com que pequenas variações em altitude tivessem classificação de cor diferentes. Com estas características, os MDTs gerados foram de alta qualidade (Figura 11). Houve apenas a presença de dois outliers no modelo gerado pelo MCC para a área um (Figura 11, itens a, b e c). A presença de outliers para este caso pode ser percebida em seu histograma, no qual as frequências se encontram comprimidas no canto esquerdo e possui uma amplitude superior aos demais (2,21m, enquanto nos demais ela é inferior a 1m). Ao se investigar esses dois outliers, eles se encontravam no perímetro da área e havia uma linha de pontos de aproximadamente 100 metros conectando-os. Logo, pode-se tratar de um pivô central de irrigação, onde os pontos de sua extremidade não foram.

Quando analisada a diferença de elevação entre os MDTs gerados por uma ferramenta em relação aos gerados por outro (Figura 12) nota-se que, em relação ao *LASground*, o *Groundfilter* superestima a elevação para as três áreas, chegando a 53 cm de diferença entre os pontos mais distantes entre si para a primeira área, 40 cm na segunda e 18 cm na terceira; esta última com o menor erro geral. As variações máxima do MCC para o *LASground* foram de 1,84 m na área um, 40 cm na dois e 14 cm na três. Em relação ao *Groundfilter*, o MCC superestimou a elevação para as três áreas, com diferenças máximas alcançando 1,9 m na primeira área, 16 cm na segunda e apenas 4 cm na terceira. Dessa forma, os valores de elevação do modelo gerado pelo *LASground*, nos pontos onde eles foram menores que os gerados pelos outros dois filtros, podem ser os valores mais próximos do relevo real, pois foram os mais profundos (ou valores superestimados pelos outros) e podem indicar um possível foco de erosão. Além disso, O MCC apresentou *outliers* bastante significativos na área um, atingindo 1,84 e 1,9 m, respectivamente para os gráficos que o correlacionam com o *LASground* (Figura 12, b) e com o *Groundfilter* (Figura 12, item c). Estes *outliers* já foram discutidos anteriormente e referem-se ao comportamento do histograma produzido para esta ferramenta nesta área (Figura 11, item c).

No entanto, de modo geral, a diferença entre os filtros foi baixa, sendo inferior a 7 cm na primeira e segunda área e 1 mm na terceira área. Para terrenos planos como estes, a acurácia esperada é de ± 25 cm, podendo alcançar ± 10 cm (Kraus & Pfeifer, 1998). A diferença entre os algoritmos entre si está dentro desse intervalo para quase que a totalidade das três áreas. Dessa forma, todos os filtros foram satisfatórios para as condições encontradas (densidade de pontos, relevo, cobertura da terra).

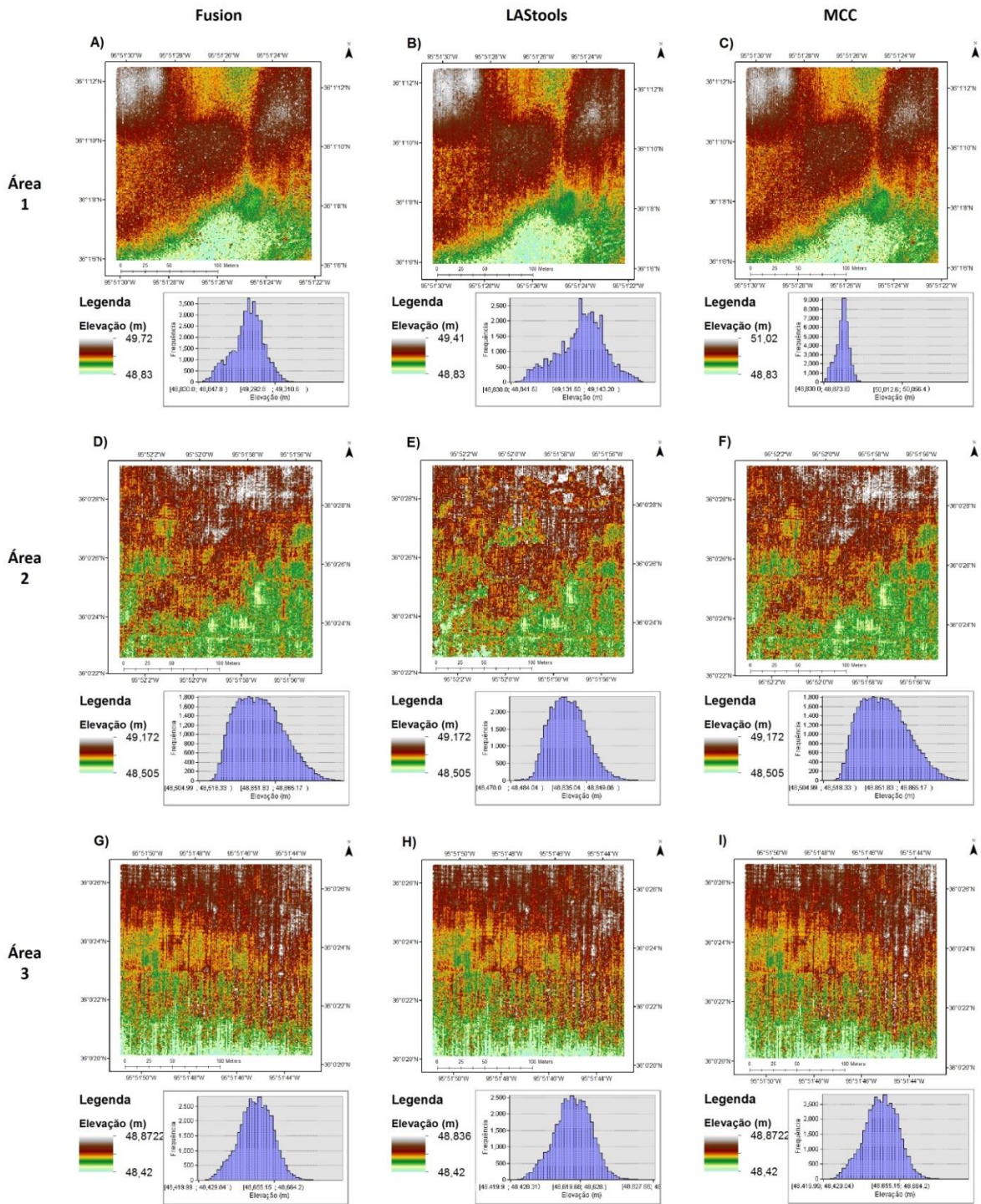


Figura 11 MDTs gerados para o ambiente agrícola acompanhados de seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados para as áreas 1, 2 e 3 pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i).

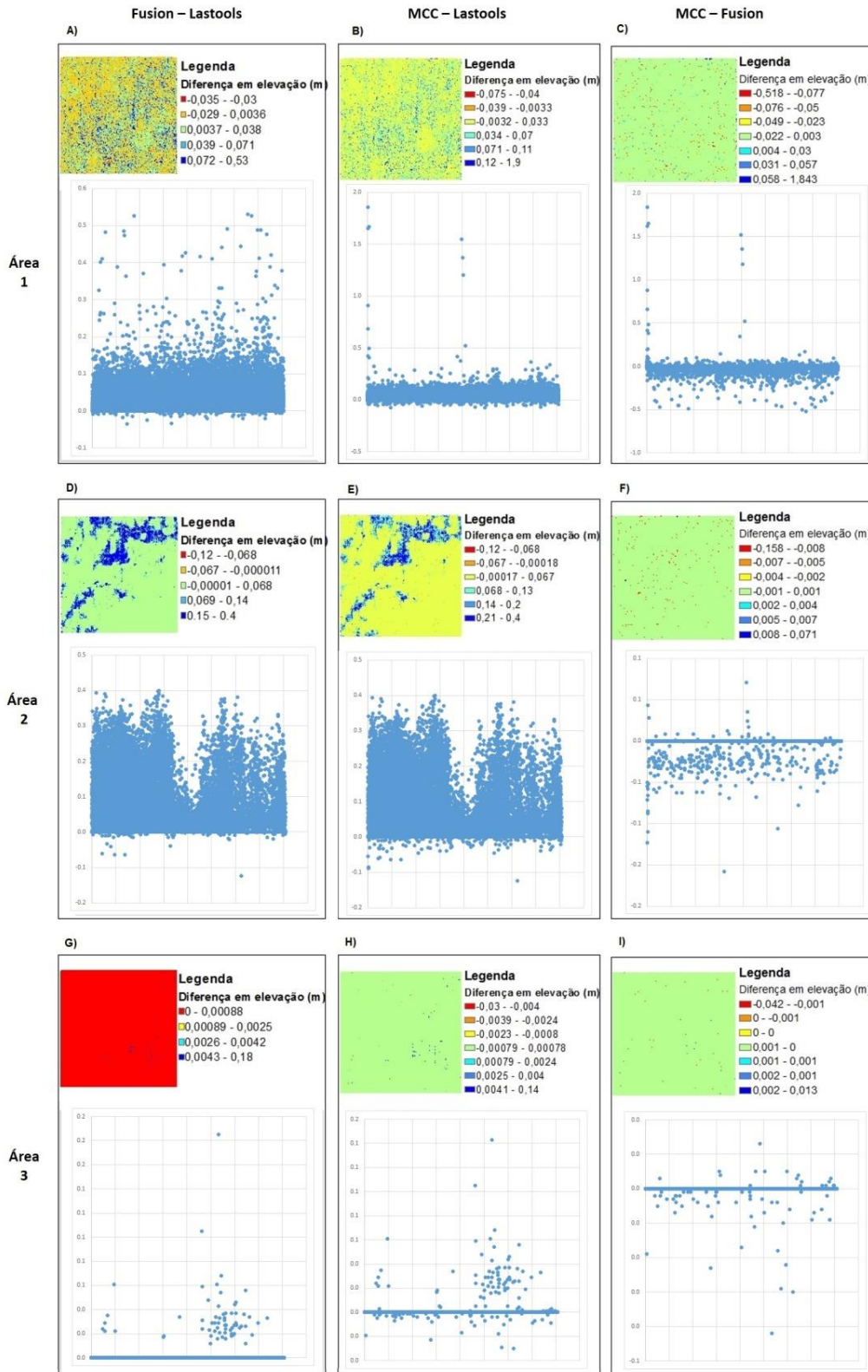


Figura 12 Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente agrícola. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g), MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i).

5.1.5 Ambiente arbustivo

Este é um ambiente com baixa densidade de pontos (2,22 pts/m²) e relevo suave ondulado, com excessão para a terceira área que é predominantemente plana. Arbustos e arvoretas podem ser encontrados esparsados ao logo do relevo das três áreas. Assim como o ambiente anterior, o MDTs gerados foram de alta qualidade (Figura 13), com apenas um *outlier* para o MDT gerado pelo MCC para a primeira área. Nesse ambiente foi possível reforçar uma característica do *Groundfilter* em sua configuração padrão já encontrada nos ambientes urbano e desértico. Essa característica é a suavização das bordas de superfícies com mudanças bruscas de altitude (bordas de edificações e áreas de drenagem, por exemplo). Na terceira área é possível notar que o que parece ser uma linha de drenagem é mais espessa no modelo produzido pelo algoritmo incorporado à ferramenta do Fusion, seguido pelo produzido no MCC e no algoritmo incorporado à ferramenta do Lastools preservando melhor a borda. Além disso, a terceira área, que é bastante plana, não foi reconhecida pelo MCC nas dimensões defidas para este trabalho (200 x 200 m). O programa simplesmente não gerava outputs para essa área quando executado. A solução foi aumentá-la acrescentando 100 metros em todas as direções. Dessa forma o algoritmo processou os dados. Esse “bug” pode ser efeito, então, da combinação de uma pequena área (4000m²), baixa densidade de pontos (2,22) e da pequena variação do relevo.

Na primeira área (Figura 14, itens a, b, c), a diferença entre os MDTs provenientes da filtragem nas ferramentas do Fusion e do Lastools foi inferior a 4 cm para a maior parte do terreno, o mesmo encontrado para a diferença entre MCC e Lastools. Para a comparação entre o MCC e o Fusion essa diferença (para a maior parte do terreno) foi de 5 cm. O algoritmo incorporado no *Groundfilter* gerou elevações menores que as geradas pelo algoritmo incorporado no *LASground* e no MCC em uma região que possivelmente indica um córrego, com até 1,24 metros de diferença entre eles (Figura 14, itens a e c). Nessa região, os produtos do MCC e do *LASground* apresentaram poucos valores se diferindo, com máximas atingindo 56 cm. Por outro lado, o MCC gerou um ponto (*outlier*) 7,3 m mais alto que o mesmo ponto localizado nos modelos do *Groundfilter* e do *LASground* (Figura 14, b e c).

Na segunda área, a diferença entre os algoritmos foi, principalmente, consequência da presença de uma estrada cortando o terreno. No geral, a diferença entre os algoritmos foi inferior a 7 cm para as três comparações. No entanto, o comportamento diferenciado dos filtros nas margens da estrada produziu uma diferença alcançando até 1,67 m, 1,4 m e 1,66 m, respectivamente para a comparação entre os modelos do *Groundfilter* e *LASground*, MCC e *LASground* e MCC e *Groundfilter*. Como já vem ocorrendo em situações similares em outras áreas, o algoritmo implementado no *Groundfilter* gerou os menores valores de elevação para locais com que apresentam quinas, ou seja ângulos salientes.

A diferença entre os três algoritmos foi inferior a 9 cm para a maior parte do terreno nas três comparações (Fusion – Lastools, MCC – Lastools e MCC – Fusion). Novamente, a presença de aparentes drenos promoveu a diferença mais significativa entre os MDTs gerados. Essa diferença alcançou 1,57 m, 1,3 m e 1,6 m, respectivamente para a comparação entre os algoritmos de *Groundfilter* e *LASground*, MCC e *LASground* e MCC e *Groundfilter*, apresentando o mesmo comportamento encontrado nas outras duas áreas para locais com esta característica neste ambiente.

Apesar dos resultados terem sido bastante satisfatórios para os três algoritmos, com diferença entre os MDTs inferior a 9 cm nas três áreas, destaca-se a possível subestimação da elevação (geração de valores de elevação menores do que o real) por parte do algoritmo que compõe o *Groundfilter* em situações em que o relevo apresenta arestas, sejam elas naturais ou

causadas pelo homem, como nos casos colocados acima. Logo, faz-se necessário o ajuste dos seus parâmetros para adaptação a essas condições. Em adição, O *MCC filter* apresentou um *outlier* bastante significativo (7,3 m) na primeira área, o que pode estar relacionado com a relativa baixa densidade de pontos desta área associado a forma de filtragem desse algoritmo (Classificação pela curvatura em multiescalas). A presença de uma árvore com copa bastante densa fez com que poucos pontos atingisse o solo, fato esse que pode ter feito com que o algoritmo utilizasse de pontos da copa, gerando o erro.

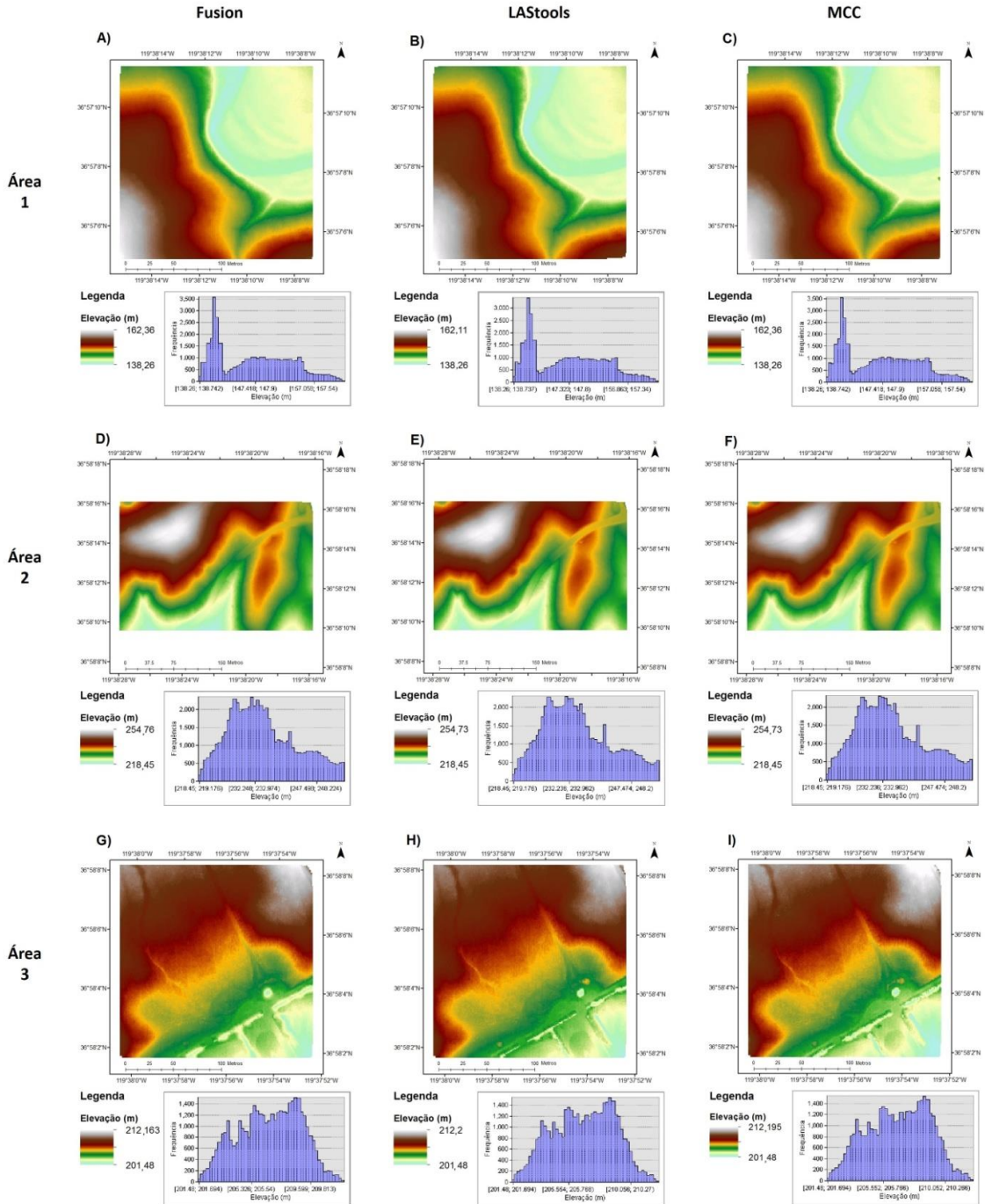


Figura 13 MDTs gerados para o ambiente arbustivo acompanhados de seus respectivos histogramas de frequência das elevações (m). Modelos gerados pelo Fusion (a, d e g), Lastools (b, e e h) e MCC (c, f e i) para a área 1 (a, b e c), 2 (d, e e f) e 3 (g, h e i).

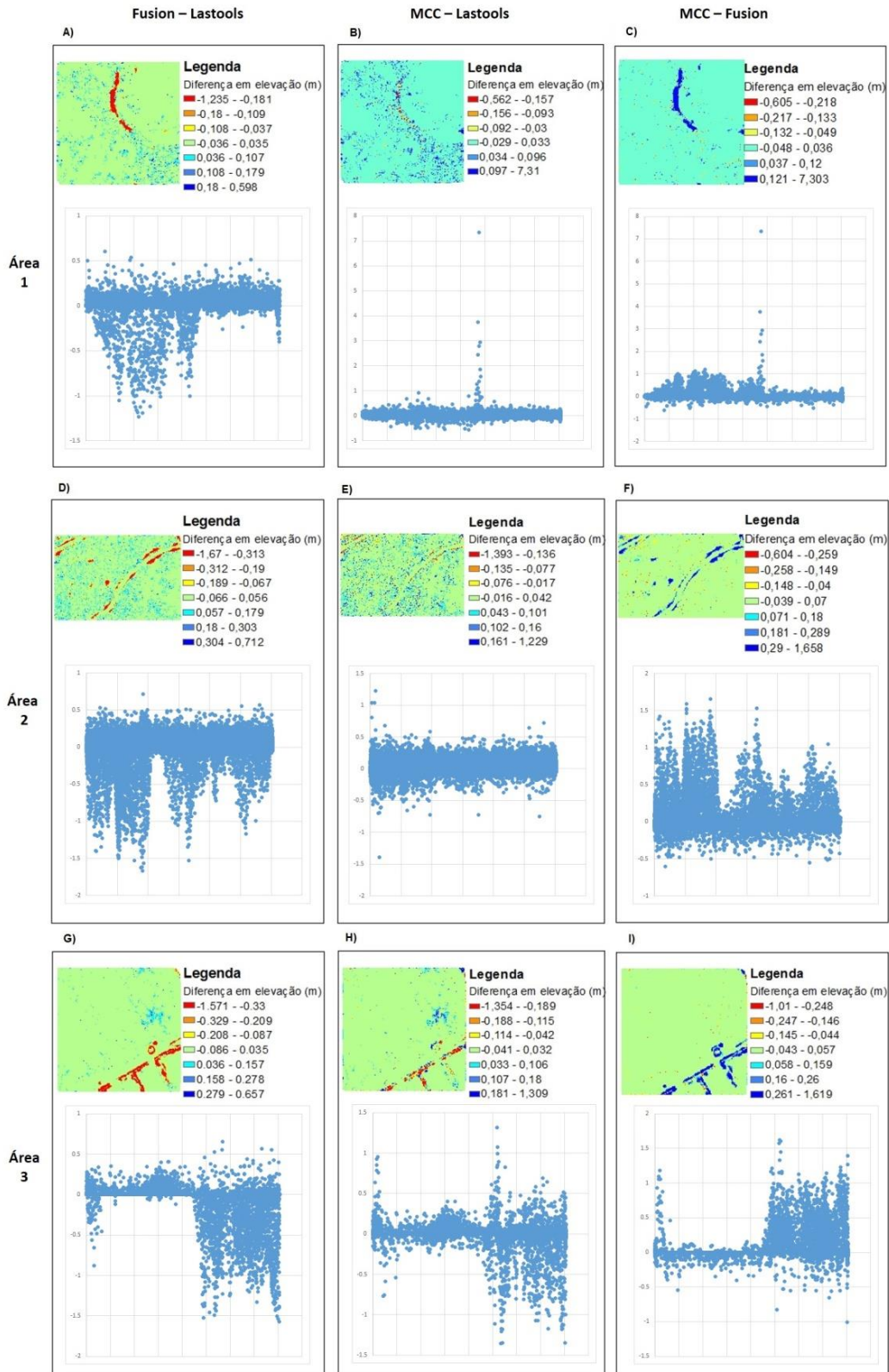


Figura 14 Diferença entre os MDTs e seus respectivos gráficos de diferença da elevação (m) entre os filtros para o ambiente arbustivo. Fusion – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (a, d e g), MCC – Lastools para as áreas 1, 2 e 3 (b, e e h) e MCC – Fusion para as áreas 1, 2 e 3 (c, f e i).

6. CONCLUSÃO

De modo geral, o algoritmo XXX implementado no *LASground* apresentou a melhor performance em todos os ambientes, sendo o filtro que obteve a menor quantidade de objetos (*outliers*) classificados como constituintes do terreno em sua configuração padrão. Destaca-se que este algoritmo não gerou *outlier* negativos, como os criados pelos outros no ambiente urbano. Ainda no ambiente urbano, quando este possui edificações pequenas, o algoritmo baseado no método da densificação de progressivos TINs implementado na ferramenta *LASground* foi o único que removeu satisfatoriamente as habitações. Além disso, melhores resultados podem ser mais facilmente alcançados com este algoritmo haja vista a existência de parâmetros predefinidos para aquelas situações mais comumente encontradas.

Em seguida aparece o algoritmo de filtragem adaptado de Kraus & Pfeifer (1998) e implementado no *GroundFilter* que, apesar de ter gerado mais outliers que o algoritmo do *LASground*, obteve resultados satisfatórios e possui a vantagem de estar disponível gratuitamente. O algoritmo do *MCC filter*, por outro lado, foi o algoritmo que gerou MDTs com a maior quantidade de *outliers* e, por isso, foi o menos eficiente, levando-se em consideração apenas a configuração adotada.

Todavia, todos algoritmos foram satisfatórios na maioria das situações (desértico, florestal, agrícola e arbustivo) e podem ser aplicados sem distinção. As excessões foram os MDTs gerados para o ambiente urbano, onde os filtros não foram capazes de remover as edificações nas duas primeiras áreas, e a segunda área florestal, onde houve a presença de manchas de formações cônicas de pequeno porte para os três filtros. Este último resultado pode estar associado à baixa densidade de pontos do ambiente em questão, o que acarretou a baixa quantidade de pontos atingindo o relevo real nas manchas de vegetação de pequeno porte (regeneração) desta área.

Houve erro do tipo I (exclusão de pontos do terreno) nos cortes de estrada e bordas das drenagens geradas pela ferramenta *GroundFilter*. Logo, deve-se atentar para essa perda de terreno em situações similares quando este algoritmo for utilizado e buscar ajustar seus parâmetros para reduzir esse tipo de erro sem que cause prejuízos de outra natureza (erro tipo II).

Mais estudos dessa natureza são recomendados, principalmente testando as possíveis combinações dos parâmetros de cada algoritmo, a fim de se reduzir ao máximo a geração de erros, bem como a necessidade de edição manual dos pontos não pertencentes ao terreno.

Esse trabalho deverá ser continuado com intuito de se adicionar uma validação científica por meio da análise estatística.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, H.-E. et al. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat LiDAR flights. **Remote Sensing of Environment**, v. 151, p. 157–165, 2014.

AXELSSON, P. et al. DEM generation from laser scanner data using adaptative TIN models. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, n. B4/1; PART 4, p. 110-117, 2000.

BATER, C. W.; COOPS, N. C. Evaluating error associated with LiDAR-derived DEM interpolation. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 2, p. 289–300, 2009.

D'OLIVEIRA, M. V. N. et al. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning LiDAR in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 479–491, 2012.

EVANS, J. S.; HUDAK, A. T. A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 4, p. 1029–1038, 2007.

GIONGO, M. et al. LiDAR : princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.

HAUGERUD, R. A.; HARDING, D. J. Some algorithms for virtual deforestation (vVDF) of LiDAR topographic survey data. **Arch. Photogramm. Remote Sens.**, vol. 34, n. 3/W4, p. 211–217, 2001. Disponível em: <pugetsoundLiDAR.ess.washington.edu/vdf4.pdf> Acesso em: 20 nov. 2015.

HUG, C.; KRZYSZEK, P.; FUCHS, W. Advanced LiDAR data processing with LasTools. **XXth ISPRS Congress**, p. 12–23, 2004.

ISENBURG, Martin et al. Generating raster DEM from mass points via TIN streaming. In: **Geographic Information Science**. Springer Berlin Heidelberg, p. 186-198, 2006.

JUPP, D. L. B.; LOVELL, J. L. **Airborne and Ground-Based LiDAR Systems for Forest Measurement: Background and Principles**. CSIRO Marine and Atmospheric Research. Canberra, 2007.

LEFSKY, M. A. et al. LiDAR Remote Sensing for Ecosystem Studies. **BioScience**, v. 52, n. 1, p. 19, 2002.

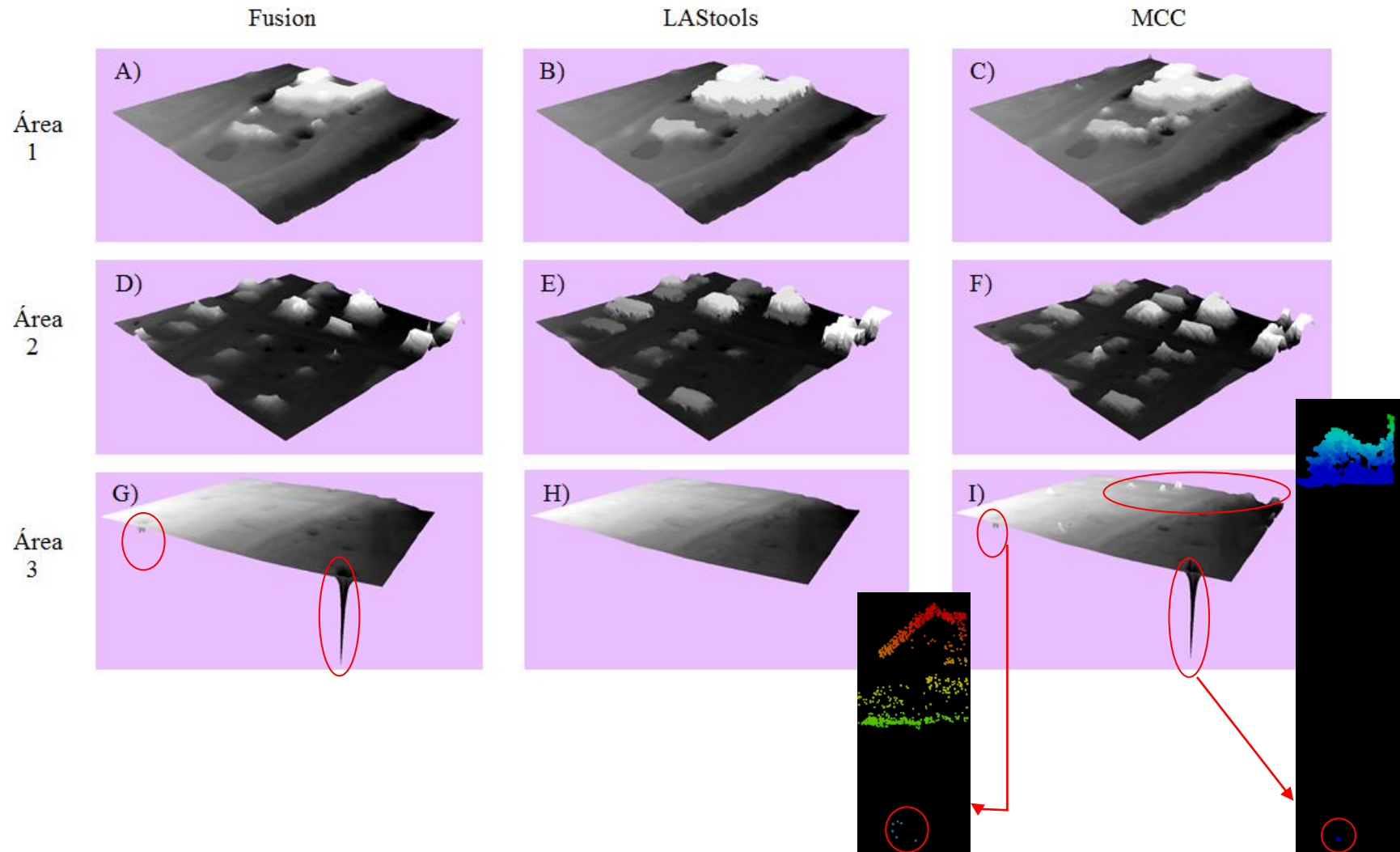
LUDWING BOLTZMANN INSTITUTE. Filtering algorithm. Disponível em: <libi-archpro.org> Acesso em: 20 de nov. 2015.

MCGAUGHEY, R. J. **FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization**. Seattle, WA: USDA/Forest Service, 2014, 154 p.

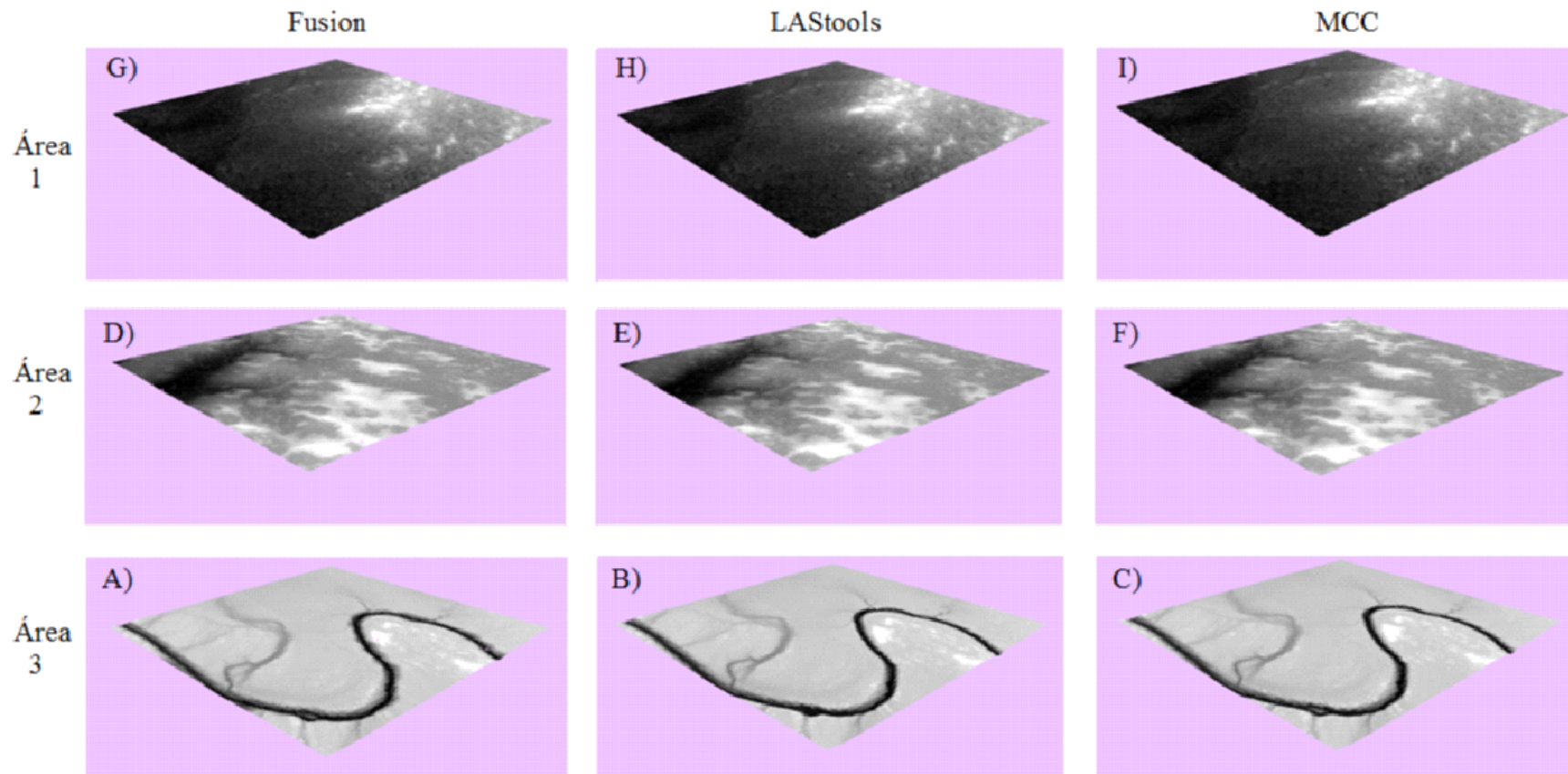
- FIGUEIREDO, E. O.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; FEARNSTIDE, P. M.; PAPA, D. D. A. Modelos para estimativa de volume de árvores individuais pela morfometria da copa obtida com LiDAR. **CERNE**, v. 20, n. 4, p. 621-628, 2014.
- PACHECO, A.P.; CENTENO, J.A.S.; ASSUNÇÃO, M.G.T.; BOTELHO, M.F. Classificação de pontos LiDAR para a geração do MDT. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n. 3, p. 417-438, 2011.
- POLAT, N.; UYSAL, M. Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. **Measurement**, v. 63, p. 61–68, 2015.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. Advanced DTM generation from LIDAR data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 34, n. 3/W4, p. 22-30, 2001.
- KRAUS, K. L.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded- areas with airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 53, n. 4, p. 193–203, 1998.
- REUTEBUCH, S.E., ANDERSEN, H.-E., MCGAUGHEY, R.J. Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. **Journal of Forestry**, v. 103, n. 6, p. 286-292, 2005.
- REUTEBUCH, S. E. et al. Accuracy of a high-resolution LiDAR terrain model under a conifer forest canopy. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 527–535, 2003.
- SILVA, C. A. et al. Variações de MDTs gerados a partir de dados LiDAR: Estudo comparativo entre diferentes classificadores. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2013, p. 6113–6120.
- SITHOLE, G.; VOSSELMAN, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 59, n. 1, p. 85–101, 2004.
- YAN, W. Y.; SHAKER, A.; EL-ASHMAWY, N. Remote Sensing of Environment Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 295–310, 2015.
- YUNFEI, B. et al. Classification of LiDAR point cloud and generation of DTM from LiDAR height and intensity data in forested area. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 37, n. 7, p. 313-318, 2008.

APÊNDICES

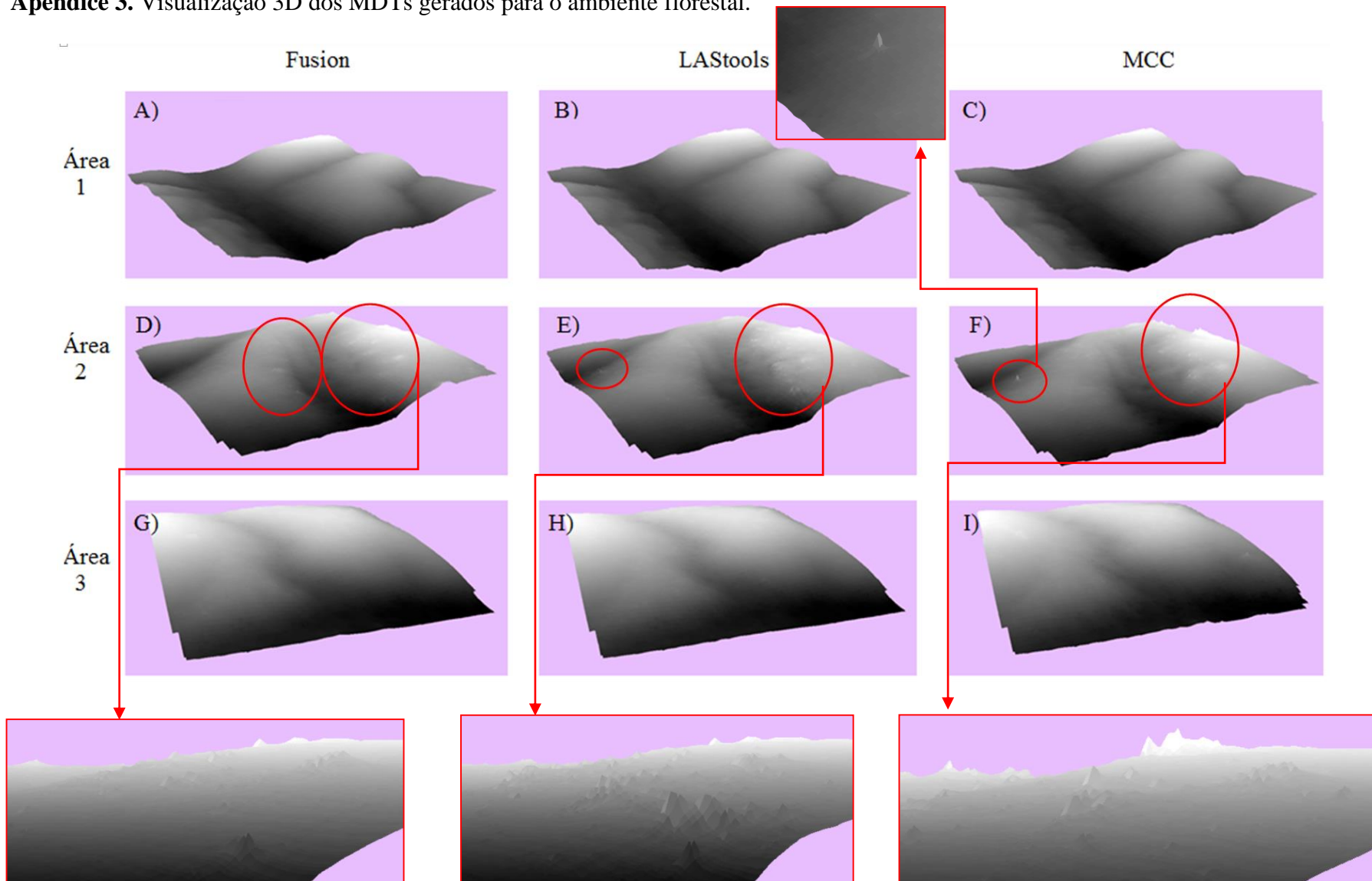
Apêndice 1. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente urbano.



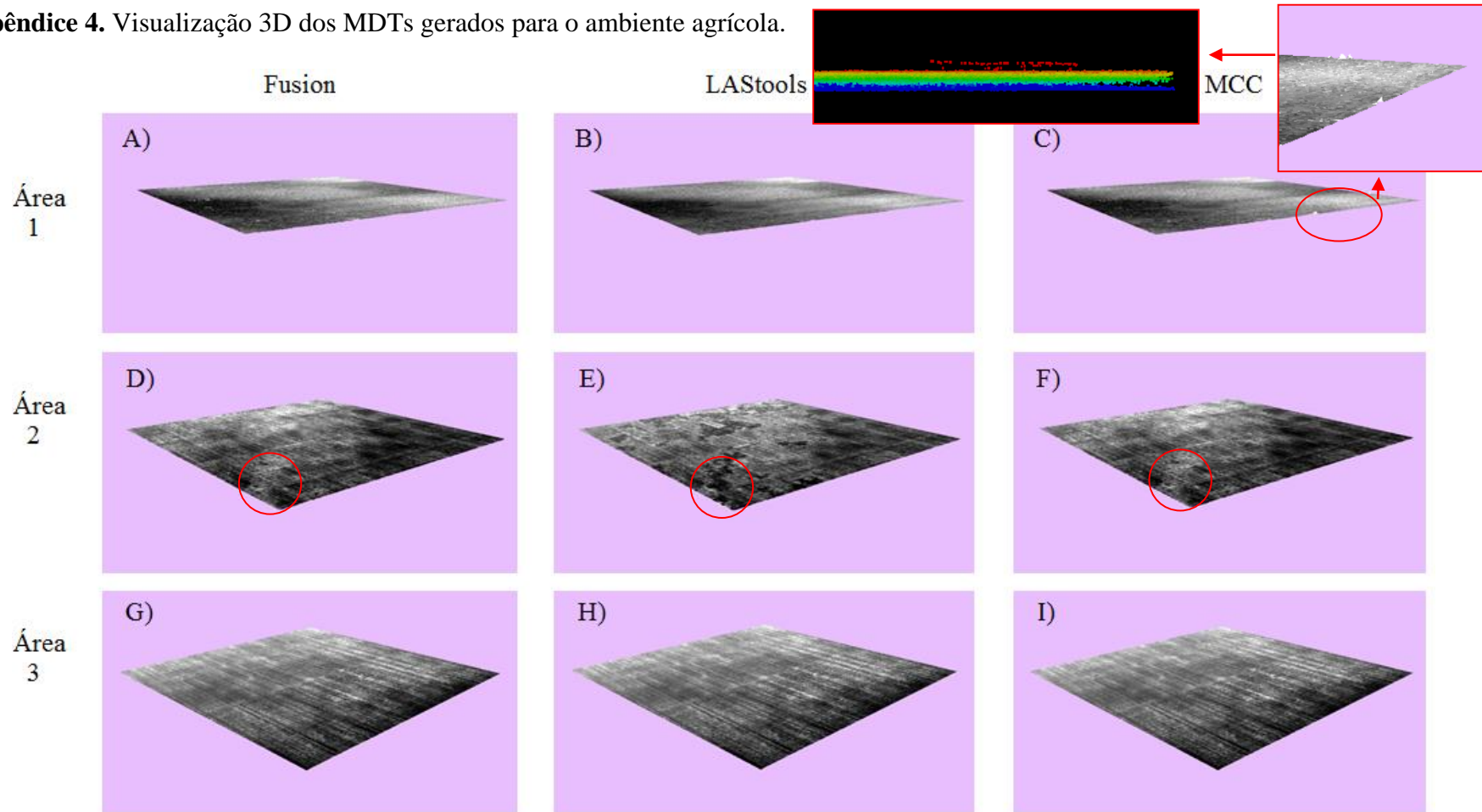
Apêndice 2. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente desértico.



Apêndice 3. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente florestal.



Apêndice 4. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente agrícola.



Apêndice 5. Visualização 3D dos MDTs gerados para o ambiente arbustivo.

