UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CURSO DE GEOGRAFIA - BACHARELADO

LEIVAS TEIXEIRA LOPES
LUIS FERNANDO BONFIM MASSOCATTO

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO ENTRE O LEVANTAMENTO GNSS EM PÓS-PROCESSAMENTO (L1 E L1/L2) E O SERVIÇO DE CORREÇÃO POR SATÉLITE (RTX): um estudo de caso em área controlada

CAMPO GRANDE – MS
2026

LEIVAS TEIXEIRA LOPES
LUIS FERNANDO BONFIM MASSOCATTO

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO ENTRE O LEVANTAMENTO GNSS EM PÓS-PROCESSAMENTO (L1 E L1/L2) E O SERVIÇO DE CORREÇÃO POR SATÉLITE (RTX): um estudo de caso em área controlada

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Geografia - Bacharelado da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Ary Tavares Rezende Filho

CAMPO GRANDE – MS
2026

Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – BACHARELADO

Às 17:00 horas do dia 17 de julho, reuniu-se a Banca Examinadora, sob Presidência do Professor Orientador, para avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Geografia - Bacharelado da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Acadêmicos: Leivas Teixeira Lopes RGA: 2018.2109.038-1

Luis Fernando Bonfim Massocatto RGA: 2021.2109.005-0

Título: "ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO ENTRE O LEVANTAMENTO GNSS EM PÓS-PROCESSAMENTO (MONOFREQUÊNCIA L1 E DUPLA FREQUÊNCIA L1/L2) E O SERVIÇO DE CORREÇÃO POR SATÉLITE (RTX): um estudo de caso em área controlada":

A banca composta pelos examinadores abaixo relacionados emitiu os seguintes conceitos:

Examinadores:	Conceito:
Prof. Dr. Ary Tavares Rezende Filho (orientador)	
Prof. Dr. Marcelino de Andrade Gonçalves (membro)	
Me. Pedro Paulo Barreto Cristofori (membro)	
Dr. Rennan Vilhena Pirajá (suplente)	

Conceito Final: (**X**) Aprovado ( ) Reprovado

Observação:

Este é o parecer.

Campo Grande, 17 de julho de 2026.

NOTA MÁXIMA NO MEC UFMS É 10!!!

Documento assinado eletronicamente por **Ary Tavares Rezende Filho**, **Professor do Magisterio Superior**, em 17/07/2026, às 18:35, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Rennan Vilhena Pirajá**, **Usuário Externo**, em 17/07/2026, às 18:37, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Pedro Paulo Barretto Cristofori**, **Usuário Externo**, em 17/07/2026, às 18:41, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6538307** e o código CRC **DBBB7C94**.

COLEGIADO DE GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA (BACHARELADO)
Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária
Fone: 67 3345-7433
CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter guiado cada passo desta jornada e me conceder força, sabedoria e coragem para enfrentar os desafios, permitindo que eu chegasse até aqui.

Ao Professor Ary Tavares Rezende Filho, expresso minha gratidão pela orientação, paciência e confiança, bem como pelo apoio e pela disponibilidade em me ensinar e ajudar nesta etapa da minha vida.

À colega de classe Cléia Montezano, agradeço pelo companheirismo nas inúmeras viagens de campo e dias em sala de aula. Uma amizade que conservo desde o início do curso, em 2018, na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Aos meus pais, Creuza e Licínio, minha eterna gratidão por todo amor, apoio e ensinamentos que carrego comigo diariamente. Obrigado por nunca medirem esforços para que este objetivo se tornasse realidade e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

Às amizades que construí durante a graduação, deixo meu agradecimento pela convivência, pelas trocas de experiências, risadas, parceria e momentos compartilhados. Aos meus professores, agradeço pela dedicação, paciência e conhecimentos transmitidos, pois cada um de vocês contribuiu de forma significativa para minha formação pessoal e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação acadêmica e para a concretização desta importante etapa da minha vida.

Leivas Teixeira Lopes

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela saúde que me permitiu chegar a este momento tão especial.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ary Tavares Rezende Filho, minha especial gratidão pela dedicação, apoio, paciência e insistência, aspectos fundamentais para a conclusão deste curso.

Agradeço à minha esposa, Lourdes, por sempre acreditar em mim, apoiar-me e compartilhar comigo essa trajetória espinhosa, porém vitoriosa.

Agradeço, de modo especial, aos meus pais, Prof.ª Maria e Prof. Hélio (*in memoriam*), que sempre me incentivaram a estudar e foram exemplos e referências na educação.

Aos professores que fizeram parte dessa longa trajetória, agradeço pela competência, dedicação e didática na transmissão do conhecimento.

Agradeço aos meus colegas de curso pela convivência, pelo companheirismo e pelas experiências compartilhadas ao longo dessa caminhada.

Agradeço também aos amigos de longa data, que, de diferentes formas, estiveram presentes em minha vida acadêmica e pessoal.

Foram muitas as pessoas que contribuíram para minha trajetória acadêmica até este momento. A todos, expresso minha sincera gratidão pela colaboração, apoio e incentivo.

Luis Fernando Bonfim Massocatto

RESUMO

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO ENTRE O LEVANTAMENTO GNSS EM PÓS-PROCESSAMENTO (L1 E L1/L2) E O SERVIÇO DE CORREÇÃO POR SATÉLITE (RTX): um estudo de caso em área controlada

A evolução das geotecnologias tem consolidado o GNSS como ferramenta essencial para levantamentos georreferenciados de alta precisão. Objetivo deste trabalho foi comparar o desempenho técnico e operacional de três metodologias GNSS: pós-processamento monofrequência L1 , pós-processamento dupla frequência L1/L2 e o serviço de correção em tempo real RTX, em uma área controlada com cinco marcos de referência. A metodologia envolveu levantamentos de campo com os três sistemas, processamento dos dados no software TOPCON Tools e a análise comparativa de parâmetros de qualidade, precisão, exatidão e eficiência operacional. Os resultados demonstraram que o RTX apresentou o melhor desempenho operacional, com tempo médio de rastreio reduzido, maior número médio de satélites rastreados e precisão horizontal entre 0,018 m e 0,036 m nos vértices avaliados. A solução L1/L2 alcançou precisão milimétrica em condições favoráveis, porém apresentou limitações sob cobertura vegetal. A solução L1 apresentou maior variabilidade, com precisão horizontal de até 2,154 m no vértice M1, indicando maior sensibilidade às condições locais de rastreio. Conclui-se que, nas condições avaliadas neste estudo de caso, a tecnologia RTX apresentou melhor desempenho operacional e resultados compatíveis com aplicações de georreferenciamento, desde que observadas as limitações impostas por cobertura vegetal, obstruções de sinal e necessidade de validação dos pontos críticos.

Palavras-chave: GNSS, Pós-processamento, RTX, Georreferenciamento, Imóveis Rurais.

ABSTRACT

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS BETWEEN GNSS SURVEYING IN POST-PROCESSING (L1 AND L1/L2) AND THE SATELLITE CORRECTION SERVICE (RTX): a case study in a controlled area

The evolution of geotechnologies has consolidated GNSS as an essential tool for high-precision georeferenced surveys. The objective of this study was to compare the technical and operational performance of three GNSS methodologies: L1 single-frequency post-processing, L1/L2 dual-frequency post-processing, and the RTX real-time correction service, in a controlled area with five reference benchmarks. The methodology involved field surveys using all three systems, data processing in TOPCON Tools software, and comparative analysis of quality parameters, precision, accuracy, and operational efficiency. The results demonstrated that RTX showed the best operational performance, with reduced average tracking time, a higher average number of tracked satellites, and horizontal precision between 0.018 m and 0.036 m at the evaluated vertices. The L1/L2 solution achieved millimeter-level precision under favorable conditions but presented limitations under vegetation cover. The L1 solution showed greater variability, with horizontal precision of up to 2.154 m at vertex M1, indicating higher sensitivity to local tracking conditions. It is concluded that, under the conditions evaluated in this case study, RTX technology showed better operational performance and results compatible with georeferencing applications, provided that the limitations imposed by vegetation cover, signal obstructions, and the need for validation of critical points are observed.

Keywords: GNSS, Post-processing, RTX, Georeferencing, Rural Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferenciação de GPS e GNSS 16
Figura 2: Localização da área de estudo 22
Figura 3: Software TOPCON Tools 29
Figura 4: Dados da base o Marco MS-01, da Rede Geodésica MS 31
Figura 5: Dados de processamento dos dados Marco local de referência (L1/L2) 32
Figura 6: Imagens dos Marcos de rastreio com a Coletora L1- GTR-A 34
Figura 7: Imagens dos Marcos de rastreio com a tecnologia L1/L2 - HIPER SR 35
Figura 8: Imagens dos Marcos de rastreio com a tecnologia RTX – DA2 37
Figura 9: Processamento dos dados L1 no *software* TOPCON Tools 42
Figura 10: Processamento dos dados do receptor GNSS L1/L2 no *software* TOPCON Tools 44
Figura 11: Condições adversas no rastreio nas diferentes tecnologias 55
Figura 12: Representação circular do erro horizontal dos vértices M1 e M3 por Solução 58
Figura 13: Mapa da Solução RTX da Área de Estudo 59
Figura 14: Sobreposição dos Mapas: Matrícula vs. Solução RTX 61

LISTA DE FOTOS

Foto 1: Receptor Base - GNSS Modelo GTRG2 25
Foto 2: Receptor Rover - GNSS Modelo GTR-A 25
Foto 3: Receptor Base - GNSS Topcon HiperSR - Portadoras L1/L2 26
Foto 4: Receptor Rover - GNSS Topcon HiperSR - Portadoras L1/L2 27
Foto 5: Receptor Rover - GNSS da marca Trimble, Modelo DA2 - RTX 28
Foto 6: Marco MS-01, da Rede Geodésica de Mato Grosso do Sul 30

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolução dos desvios Padrão das Coordenadas – Processamento PPP 33
Gráfico 2: Comparação da precisão horizontal (RMS 2D) por tecnologia e vértice 48
Gráfico 3: Comparação da área (ha) entre as soluções GNSS e a matrícula 50
Gráfico 4: Comparação do perímetro (m) entre as Soluções GNSS e a Matrícula 51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Síntese da Evolução Normativa do Georreferenciamento no Brasil 15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coordenadas do marco MS-01 nos Datum SAD-69 e SIRGAS2000 31
Tabela 2: Coordenadas obtidas via PPP (IBGE) para o marco implantado 33
Tabela 3: Coordenadas UTM dos pontos M1 a M5 e da base geodésica..... 35
Tabela 4: Comparação das distâncias entre marcos (metros) por tecnologia..... 38
Tabela 5: Dados extraído do arquivo RINEX dos ocupado pela coletora L1 39
Tabela 6: Dados extraídos do arquivo RINEX das ocupações pela portadora L1/L2..... 40
Tabela 7: Parâmetros de rastreio da tecnologia RTX – DA2 41
Tabela 8: Resumo dos parâmetros médios de rastreio por tecnologia 41
Tabela 9: Coordenadas corrigidas e desvios padrão – Coletora L1 43
Tabela 10: Dados processados pelo *software* TOPCON Tools - Receptor GNSS L1/L2.. 44
Tabela 11: Resumo das coordenadas finais por tecnologia – L1, L1/L2 e RTX..... 45
Tabela 12: Desvios padrão e precisão horizontal – Solução L1..... 46
Tabela 13: Desvios padrão e precisão horizontal – Solução L1/L2 47
Tabela 14: Desvios padrão e precisão horizontal – Solução RTX 47
Tabela 15: Comparação da precisão horizontal (m) por solução e vértice..... 48
Tabela 16: Comparação de área e perímetro entre as soluções GNSS e a matrícula 49
Tabela 17: Diferenças de área por solução em relação à matrícula 50
Tabela 18: Diferenças de perímetro por solução em relação à matrícula..... 51
Tabela 19: Efeito do pós-processamento sobre a área e o perímetro 52

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 11

CAPÍTULO I 13

1. REFERENCIAL TEÓRICO 13

1.1 Georreferenciamento de Imóveis Rurais 13

1.1.1 Definição e Evolução Normativa 13

1.2 Evolução Tecnológica do Posicionamento por Satélite: Do GPS ao GNSS no Contexto do Georreferenciamento de Imóveis Rurais 15

1.2.1 Origens do GPS e sua aplicação cadastral inicial 16

1.2.2 A transição para o conceito GNSS e a expansão das constelações 17

1.2.3 Implicações para o georreferenciamento de imóveis rurais 18

1.3 Evolução Tecnológica dos Levantamentos Aplicados ao Georreferenciamento de Imóveis Rurais: da Monofrequência L1 ao Posicionamento RTX 18

1.3.1 Levantamentos com uso da monofrequência L1: Os pioneiros com limitações operacionais 18

1.3.2 Levantamentos com uso da dupla frequência L1/L2: correção ionosférica e ganho de precisão 19

1.3.3 Levantamentos com uso do sistema GNSS-RTK: produtividade em tempo real 19

1.3.4 Levantamentos com uso do sistema RTX: correções via satélite e autossuficiência em campo 20

CAPÍTULO II 22

2. MATERIAIS E MÉTODOS 22

2.1 Área de Estudo 22

2.2 Procedimentos Metodológicos 24

2.2.1 Levantamento com receptor GNSS monofrequência L1 24

2.2.2 Levantamento com receptor GNSS de dupla frequência L1/L2 26

2.2.3 Levantamento com tecnologia RTX 27

2.2.4 Pós-processamento dos dados GNSS 28

CAPÍTULO III 30

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 30

3.1 Resultados 30

3.1.1 Marcos de referência para levantamento com a coletora L1 e receptor GNSS de dupla frequência L1/L2 30

3.1.1.1 Levantamento L1 – Marco Geodésico 30

3.1.1.2 Levantamento com receptor GNSS de dupla frequência L1/L2 – Marco Base de Referência 31
3.1.2 Levantamento da área de estudo com as diferentes tecnologias (L1; L1/L2 e RTX) 34
3.1.2.1 Levantamento com Coletora L1 – Modelo GTR-A 34
3.1.2.2 Levantamento com receptor GNSS de dupla frequência L1/L2 – Modelo HIPER SR 35
3.1.2.3 Levantamento com tecnologia RTX – Modelo DA2 37
3.1.2.4 Síntese Comparativa das Distâncias entre as Tecnologias 38
3.1.3 Parâmetros de Qualidade do Rastreio e Eficiência Operacional 39
3.1.3.1 Coletora L1 – Modelo GTR-A 39
3.1.3.2 Receptor GNSS L1/L2 – Modelo HIPER SR 40
3.1.3.3 RTX – Modelo DA2 40
3.1.3.4 Comparação dos Parâmetros de Rastreio das diferentes tecnologias 41
3.1.4 Pós-processamento dos Dados Brutos 42
3.1.4.1 Pós-processamento dos dados brutos da coletora L1 – Modelo GTR-A 42
3.1.4.2 Pós-processamento dos dados brutos do recepor GNSS L1/L2 - Modelo HIPER SR 43
3.1.4.3 Pós-processamento dos dados da tecnologia RTX – Modelo DA2 45
3.1.4.4 Síntese das Coordenadas Processadas por Tecnologia 45
3.1.5 Análise de precisão e erro horizontal das soluções GNSS 46
3.1.5.1 Precisão das soluções — desvios padrão 46
3.1.5.1.1 Solução L1 – Coletora GTR-A 46
3.1.5.1.2 Solução L1/L2 – Portadora HIPER SR 47
3.1.5.1.3 Solução RTX – Modelo DA2 47
3.1.5.2 Análise Comparativa da Precisão entre as Soluções 48
3.1.6 Comparação dos Resultados Geométricos (Área e Perímetro) com os Dados da Matrícula 49
3.1.6.1 Análise da Área de Estudo 50
3.1.6.2 Análise do Perímetro 51
3.1.6.3 Efeito do Pós-processamento sobre a Geometria da Poligonal 51
3.2 Discussão dos Resultados 53
3.2.1 Tempo de Ocupação, Produtividade em Campo e Relação com a Qualidade dos Dados 53
3.2.2 Número de Satélites e Qualidade da Geometria 55
3.2.3 Análise da Precisão dos Métodos 56
3.2.3.1 Solução L1 – Alta Variabilidade e Suscetibilidade a Condições Desfavoráveis 56

3.2.3.2 Solução L1/L2 – Alta Precisão e Consistência 56
3.2.3.3 Solução RTX – Alta Precisão e Homogeneidade 57
3.2.4 Correlação entre o Erro Horizontal dos Vértices e o Aumento da Área e do Perímetro 57
3.2.4 Associação entre o erro horizontal dos vértices e as alterações de área e perímetro . 57
3.2.5 A Sobreposição dos Mapas e as Implicações para a Atualização Cadastral 60
CONSIDERAÇÕES FINAIS 62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64

INTRODUÇÃO

A evolução das Geotecnologias tem transformado profundamente as áreas da geociência, estabelecendo novos padrões de acurácia e produtividade (SILVA, 2022). Dentro deste panorama, o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) se consolidou como a principal ferramenta para a determinação precisa de coordenadas geográficas (MONTEIRO & OLIVEIRA, 2019).

A constante necessidade do mercado por dados com precisão centimétrica ou milimétrica impulsiona a busca por métodos de coleta e processamento que sejam não apenas rigorosos, mas também eficientes.

Historicamente, a elevada qualidade posicional em levantamentos GNSS foi obtida por meio do posicionamento relativo estático, com posterior pós-processamento dos dados. Inicialmente, foram empregados receptores monofrequência L1 e, posteriormente, receptores geodésicos de dupla frequência L1/L2, os quais ampliaram a capacidade de correção dos erros atmosféricos e melhoraram a precisão dos levantamentos. O uso de receptores de dupla frequência L1/L2 permitiu mitigar significativamente os efeitos do atraso ionosférico, aumentando a confiabilidade das soluções obtidas (COSTA, 2018; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

No entanto, as limitações inerentes a esta técnica, como a necessidade de instalar uma estação base, o tempo estendido de coleta em campo e o subsequente trabalho de processamento dos dados em *software* específico, geram um gargalo na produtividade e aumentam os custos operacionais do levantamento (RIBEIRO, 2021).

Em resposta a essa demanda por eficiência e pela popularização do posicionamento em tempo real, surgiram os serviços de correção por satélite baseados na técnica de Posicionamento por Ponto Preciso em Tempo Real (PPP-RTK) (IBGE, 2023; SEEBER, 2003).

O serviço Trimble Center Point RTX é um expoente dessa tecnologia, pois fornece correções de órbita e relógio via satélite ou internet, permitindo que o receptor obtenha acurácia de nível centimétrico sem a necessidade de uma base física local (TRIMBLE, 2026). Esta inovação trouxe um avanço significativo na agilidade do trabalho de campo e na redução dos custos com infraestrutura.

Diante disso, a questão central que orienta este trabalho é: em que medida a tecnologia RTX oferece ganho operacional em campo sem comprometer a qualidade posicional em relação aos métodos GNSS pós-processados L1 e L1/L2?

A partir dessa evolução tecnológica, o presente trabalho se justifica pela necessidade de realizar uma análise comparativa aplicada entre as tecnologias e sua evolução no tempo. É fundamental quantificar e avaliar se o ganho de produtividade oferecido pelo RTX compromete, ou não, a acurácia tipicamente alcançada pelos métodos tradicionais de pós-processamento L1 e L1/L2 (MARTINS, 2023).

Dessa forma, o objetivo geral foi analisar o desempenho técnico e operacional de diferentes metodologias de correção GNSS, comparando os levantamentos pós-processados com receptores monofrequência L1 e dupla frequência L1/L2 ao serviço de correção por satélite RTX, em uma área de estudo controlada.

Os objetivos específicos foram:

- ✓ executar o levantamento de uma área de controle por meio de três tecnologias: pós-processamento com receptores monofrequência L1, com receptores dupla frequência L1/L2 e correção em tempo real via serviço RTX;
- ✓ determinar e comparar o erro horizontal dos resultados de cada metodologia em relação às coordenadas de referência; e
- ✓ comparar os parâmetros de eficiência de campo, como o tempo de ocupação e o tempo de processamento, para quantificar a produtividade de cada método.

Este trabalho contribuirá para o entendimento e a tomada de decisão na aquisição e aplicação de tecnologias GNSS, fornecendo dados quantitativos sobre a acurácia e a eficiência real dos métodos de correção tradicional e moderno, auxiliando na definição de estratégias de levantamento mais produtivas.

CAPÍTULO I

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 Georreferenciamento de Imóveis Rurais

O georreferenciamento de imóveis rurais consiste na definição precisa da localização, forma, dimensão e confrontações de uma propriedade, utilizando métodos cartográficos e geodésicos que vinculam os limites territoriais a um sistema de referência oficial, o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Segundo o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), o objetivo principal desse procedimento é garantir a segurança jurídica da posse e da propriedade, reduzindo conflitos de sobreposição e fornecendo uma base confiável para o Cadastro Nacional de Imóveis Rurais (CNIR).

Para fins deste trabalho, adota-se como referência o Manual Técnico para Georreferenciamento de Imóveis Rurais do INCRA (2022), que estabelece os critérios técnicos para execução dos serviços de georreferenciamento de imóveis rurais públicos e privados.

Conforme aponta Nadal (2017), o georreferenciamento ultrapassa a simples medição topográfica, envolvendo uma complexa intersecção de aspectos tecnológicos (como o uso de *Global Positioning System* - GPS, estação total e imagens de satélite), normas legais (normas técnicas do INCRA) e administrativos (registro em cartório). A evolução dessa obrigatoriedade reflete o processo de modernização do Estado brasileiro no controle territorial e na arrecadação tributária, a exemplo do Imposto Territorial Rural (ITR).

Conforme o INCRA, o georreferenciamento envolve a identificação da área do imóvel rural por meio de coordenadas vinculadas ao Sistema Geodésico Brasileiro, atendendo às exigências técnicas para certificação.

1.1.1 Definição e Evolução Normativa

A obrigatoriedade do georreferenciamento de imóveis rurais no Brasil revela uma trajetória de mais de duas décadas de amadurecimento normativo. Não surgiu de uma única norma, mas consolidou-se gradualmente a partir do final dos anos 1990, partindo de exigências pontuais em 2001 até alcançar uma regra universal.

A Lei nº 10.267, de 28 de agosto de 2001 (BRASIL, 2001), que alterou a Lei nº 4.947/1966 e a Lei nº 6.015/1973 (Lei de Registros Públicos), introduziu o artigo 176, § 3º. inaugurando a obrigatoriedade técnica no país. Este dispositivo passou a exigir que, para a

averbação ou registro de desmembramento, remembramento ou parcelamento de imóveis rurais, a matrícula fosse acompanhada de planta e memorial descritivo com coordenadas georreferenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Inicialmente, contudo, a lei não estipulou um prazo final para a conversão de toda a base cadastral existente.

Na sequência, o Decreto nº 4.449, de 30 de outubro de 2002 (BRASIL, 2002), regulamentou a referida lei, estabelecendo prazos iniciais, responsabilidades do INCRA e padrões de exatidão posicional. O decreto definiu que o georreferenciamento seria exigido para qualquer transferência de propriedade ou alteração de perímetro, mas ainda não obrigava a certificação de imóveis já registrados e sem movimentação imobiliária.

Posteriormente a Lei nº 11.952, de 25 de junho de 2009 (BRASIL, 2009a), trouxe uma nova dimensão ao tema ao incluir dispositivos que vinculavam a identificação espacial à regularização fundiária de ocupações na Amazônia Legal. Ao criar o Programa Terra Legal, a norma passou a exigir a certificação georreferenciada como condição obrigatória para a titulação de terras da União.

Um ponto de inflexão voltado às propriedades coletivas ocorreu com a edição da Instrução Normativa INCRA nº 57, de 20 de outubro de 2009 (BRASIL, 2009b). Essa norma estabeleceu critérios técnicos para a demarcação e identificação de territórios quilombolas.

Esse cronograma de prazos e transições para os imóveis privados foi posteriormente reformulado pelo Decreto nº 9.311, de 15 de março de 2018 (BRASIL, 2018). O novo ato alterou o Decreto nº 4.449/2002 para estipular marcos temporais específicos de exigibilidade conforme o tamanho da propriedade, fixando o limite de 20 de novembro de 2018 para imóveis com áreas entre 100 e 250 hectares, e 20 de novembro de 2023 para aqueles entre 25 e 100 hectares.

Por outro lado, para mitigar os impactos financeiros sobre os pequenos produtores, a própria Lei nº 10.267/2001 e o Decreto nº 4.449/2002 asseguraram a isenção de custos para a identificação de propriedades cuja somatória de área não exceda a quatro módulos fiscais unidade de medida regionalizada que define a pequena propriedade rural e a agricultura familiar, conforme os parâmetros da Lei nº 11.326/2006 (BRASIL, 2006).

O Decreto Federal nº 12.689, de 21 de outubro de 2025, alterou o Decreto nº 4.449/2002 para regulamentar o disposto no art. 176, § 4º, da Lei nº 6.015/1973. Com isso, a identificação da área do imóvel rural passa a ser exigida, nas hipóteses legais de

desmembramento, parcelamento, remembramento e transferência, a partir de 21 de outubro de 2029.

Quadro 1: Síntese da Evolução Normativa do Georreferenciamento no Brasil

Ano	Norma / Evento	Impacto na Obrigatoriedade
2001	Lei nº 10.267/2001	Institui o georreferenciamento para desmembramento, parcelamento e remembramento.
2002	Decreto 4.449/2002	Regulamenta a lei, cria a certificação no INCRA e inicia o cronograma por tamanho.
2009	Lei 11.952/2009a	Exige o georreferenciamento para regularização fundiária na Amazônia Legal (Programa Terra Legal).
2009	IN/INCRA 57/2009b	Exige os mesmos critérios técnicos de alta precisão para demarcação de territórios quilombolas.
2018	Decreto 9.311/2018	Altera o Decreto nº 4.449/02, confirmando o prazo limite de 20 de novembro de 2018 para imóveis com área entre 100 e 250 hectares.
2023	Término de Prazo (Decreto nº 9.311/2018)	Encerramento do prazo para a obrigatoriedade de georreferenciamento em imóveis com áreas entre 25 e 100 hectares.
2025	Decreto nº 12.689/2025	Unifica o prazo limite para certificação de todos os imóveis para 2029.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Assim, cabe destacar que o georreferenciamento se relaciona diretamente com o princípio constitucional da função social da propriedade, previsto no artigo 5º, inciso XXIII, e no artigo 186 da Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988). A precisão cartográfica decorrente desse processo permite ao Estado fiscalizar de forma mais efetiva o cumprimento de requisitos ambientais, como a manutenção de Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal (RL), bem como aspectos trabalhistas, além de atuar como ferramenta essencial no combate à grilagem de terras.

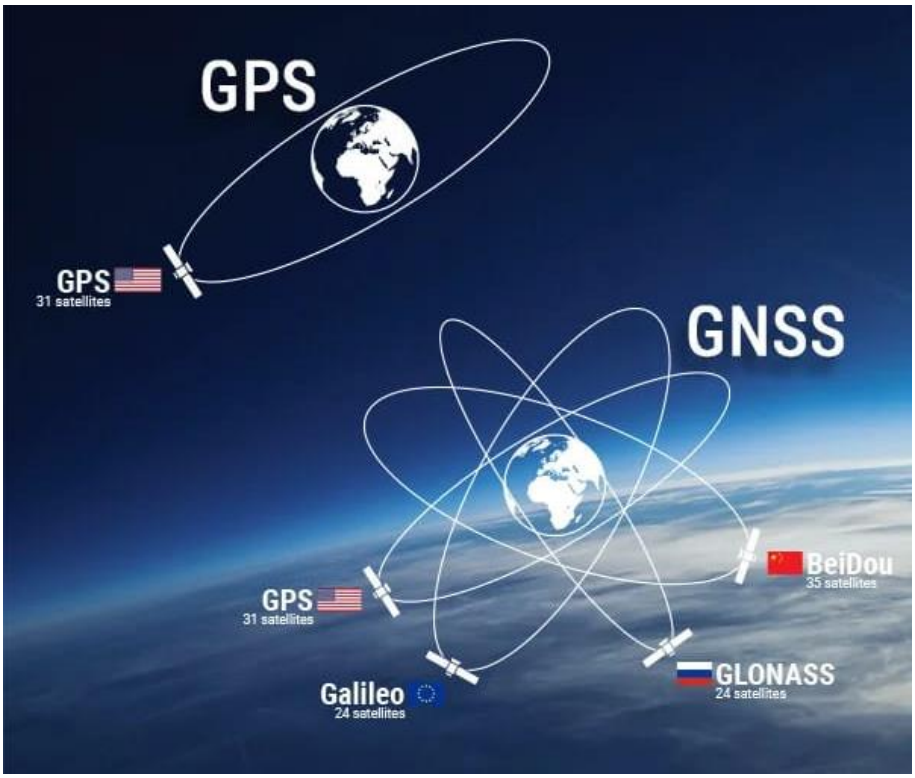
Por fim, embora o georreferenciamento imponha custos diretos relacionados à contratação de profissional habilitado e equipamentos e indiretos como o tempo de tramitação da certificação, o que explica certa resistência inicial ao seu cumprimento, a sua implementação tende a reduzir custos futuros com litígios judiciais de limites e sobreposições. Assim, a evolução do arcabouço legal reflete um movimento dialético entre a garantia do direito de propriedade e a necessidade de ordenamento do território nacional.

1.2 Evolução Tecnológica do Posicionamento por Satélite: Do GPS ao GNSS no Contexto do Georreferenciamento de Imóveis Rurais

A evolução do georreferenciamento de imóveis rurais está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento das tecnologias de posicionamento por satélite (Figura 1). A transição do

uso exclusivo do *Global Positioning System* (GPS) norte-americano para a adoção de múltiplas constelações que compõem o conceito de *Global Navigation Satellite System* (GNSS) representou um salto qualitativo significativo para a precisão, a disponibilidade e a confiabilidade dos levantamentos cadastrais.

Figura 1: Diferenciação de GPS e GNSS



Fonte: Autor desconhecido.

1.2.1 Origens do GPS e sua aplicação cadastral inicial

Os sistemas de navegação por satélite com finalidade militar remontam à década de 1960; contudo, suas aplicações civis emergiram de forma mais expressiva a partir dos anos 1980, inicialmente limitadas à navegação e não diretamente voltadas ao levantamento de propriedades (MONICO, 2008). Naquele período, o levantamento cadastral era predominantemente realizado por métodos terrestres convencionais, como o uso de teodolitos ópticos, trenas de aço e, posteriormente, estações totais.

Conforme detalham Hofmann-Wellenhof *et al*. (1997), o GPS foi concebido como um sistema de posicionamento global baseado em uma constelação de satélites que transmitem sinais de rádio, permitindo a receptores em terra calcular sua posição tridimensional com base no tempo de propagação desses sinais. A partir da década de 1990, com o fim da degradação intencional do sinal civil conhecida como *Selective Availability*

(SA), o GPS passou a oferecer precisão suficiente para aplicações cadastrais, desde que empregadas técnicas diferenciais (DGPS) para correção de erros atmosféricos e orbitais (SEEBER, 2003).

No contexto brasileiro, a exigência legal do georreferenciamento inaugurada pela Lei nº 10.267, de 28 de agosto de 2001 (BRASIL, 2001), coincidiu com um momento de consolidação do GPS como ferramenta operacional para a agrimensura. Entretanto, a dependência de uma única constelação o sistema NAVSTAR/GPS dos Estados Unidos impunha limitações operacionais significativas, particularmente em regiões com cobertura vegetal densa ou relevo acidentado, comuns em áreas rurais, onde a visibilidade de um número mínimo de satélites podia ser comprometida (KRUEGER, 2011).

1.2.2 A transição para o conceito GNSS e a expansão das constelações

Já o termo GNSS (*Global Navigation Satellite System*) surgiu para designar o conjunto integrado de sistemas de posicionamento por satélite disponíveis global ou regionalmente. Em 2010, conforme Drummond (2015), além do GPS norte-americano, já se encontravam operacionais ou em fase avançada de implementação os sistemas GLONASS (Rússia), COMPASS/BeiDou (China) e GALILEO (União Europeia), configurando um cenário de múltiplas constelações. Esta diversificação de sistemas trouxe benefícios diretos ao georreferenciamento de imóveis rurais:

a) **Maior disponibilidade e geometria de satélites**: Receptores GNSS multi-constelação podem rastrear simultaneamente dezenas de satélites, reduzindo significativamente as áreas de sombra (como vales profundos ou sob vegetação arbórea) e melhorando o fator de diluição da precisão (DOP), essencial para a qualidade do posicionamento (MONICO, 2008).

b) **Redundância e confiabilidade:** A existência de múltiplos sistemas independentes permite a verificação cruzada de sinais, aumentando a integridade dos dados coletados, aspecto crucial para a certificação de memoriais descritivos junto ao INCRA, onde erros de sobreposição podem gerar litígios fundiários.

c) **Sinais modernizados e maior precisão:** Constelações como o GALILEO e os satélites GPS modernizados (Bloco IIF e III) passaram a transmitir sinais em frequências múltiplas (L1/L2/L5 e E1/E5), permitindo que receptores de dupla frequência corrijam com maior eficácia o atraso ionosférico a principal fonte de erro no posicionamento por satélite (SEEBER, 2003, MONICO, 2000).

1.2.3 Implicações para o georreferenciamento de imóveis rurais

A evolução do GPS para o GNSS teve implicações diretas na prática do georreferenciamento no Brasil. Estudos comparativos demonstram que os métodos baseados em GNSS alcançam precisão centimétrica em tempo real, sendo plenamente compatíveis com os padrões exigidos pelas Instruções Normativas do INCRA, como o Módulo Padrão de Precisão (MPP) estabelecido desde a IN/INCRA nº 20, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005, DRUMMOND, 2015).

Em síntese, a trajetória do GPS ao GNSS reflete não apenas um avanço tecnológico, mas uma mudança paradigmática na forma como o Estado e os profissionais da Geociências compreendem e executam a delimitação do território rural. A interoperabilidade entre constelações e a contínua modernização dos sinais consolidam o GNSS como a espinha dorsal tecnológica do georreferenciamento contemporâneo, conferindo-lhe a precisão e a confiabilidade necessárias para garantir a segurança jurídica da propriedade rural no Brasil.

A ampliação do acesso a receptores GNSS de menor custo tende a reduzir barreiras econômicas para pequenos proprietários. Contudo, a dispensa ou flexibilização de exigências relacionadas ao georreferenciamento deve ser analisada a partir das normas específicas do INCRA e da legislação registral aplicável, e não apenas de normas ambientais ou urbanísticas.

1.3 Evolução Tecnológica dos Levantamentos Aplicados ao Georreferenciamento de Imóveis Rurais: da Monofrequência L1 ao Posicionamento RTX

A trajetória do georreferenciamento de imóveis rurais no Brasil é indissociável da evolução das tecnologias de posicionamento por satélite. O que se iniciou com levantamentos baseados em uma única frequência, sujeitos a significativas limitações de precisão, progrediu para sistemas multiconstelação capazes de fornecer coordenadas com acurácia centimétrica em tempo real, mesmo nos mais remotos rincões do território nacional.

1.3.1 Levantamentos com uso da monofrequência L1: Os pioneiros com limitações operacionais

Os primeiros receptores GPS voltados ao mercado civil operavam exclusivamente na frequência L1 (1575,42 MHz), sobre a qual se modula o código C/A (*Coarse/Acquisition*). Esta tecnologia representou um avanço significativo em relação aos métodos topográficos convencionais, contudo, sua precisão para fins de demarcação de limites era severamente comprometida por diversas fontes de erro, com destaque para o atraso ionosférico, o qual não podia ser modelado ou mitigado diretamente por receptores de simples frequência.

Conforme analisou Monico (2008), o erro causado pela refração dos sinais na ionosfera podia introduzir incertezas de ordem métrica a decamétrica no posicionamento absoluto. Para contornar parcialmente tais limitações, era imperativo o emprego da técnica de posicionamento diferencial (DGPS), que consistia na utilização de um receptor base instalado sobre um ponto de coordenadas conhecidas para calcular e transmitir correções aos receptores móveis. Em condições adversas de rastreio, especialmente sob obstrução de sinal, multicaminhamento ou geometria desfavorável de satélites, os receptores monofrequência L1 podem apresentar limitações para atender aos padrões de precisão exigidos em levantamentos cadastrais e de georreferenciamento.

1.3.2 Levantamentos com uso da dupla frequência L1/L2: correção ionosférica e ganho de precisão

O grande salto qualitativo para o georreferenciamento de precisão ocorreu com o advento dos receptores geodésicos de dupla frequência, capazes de rastrear simultaneamente a portadora L1 e a portadora L2 (1227,60 MHz). A dupla frequência permite formar combinações lineares de observáveis, como a combinação *ion-free*, reduzindo significativamente os efeitos do atraso ionosférico e melhorando a qualidade das soluções GNSS.

No contexto brasileiro, a consolidação dos receptores de dupla frequência L1/L2 coincidiu com a regulamentação do georreferenciamento pela Lei nº 10.267/2001 e, sobretudo, com a definição do Módulo Padrão de Precisão (MPp) pela IN/INCRA nº 20/2005. Os métodos de levantamento estático e estático-rápido com dupla frequência tornaram-se o padrão de fato para a determinação dos vértices de apoio e dos limites das propriedades, oferecendo a acurácia necessária (geralmente menor que 0,50 m) para a certificação dos memoriais descritivos junto ao INCRA (KRUEGER, 2011). Apesar da elevada precisão, estes métodos exigiam pós-processamento dos dados em escritório e, frequentemente, longos períodos de ocupação dos pontos, impactando a produtividade das equipes de campo.

1.3.3 Levantamentos com uso do sistema GNSS-RTK: produtividade em tempo real

A evolução subsequente veio com a técnica de posicionamento cinemático em tempo real, amplamente conhecida pelo acrônimo RTK (*Real Time Kinematic*). Diferentemente dos métodos estáticos que demandam pós-processamento, o RTK baseia-se na transmissão instantânea de correções diferenciais de fase da portadora entre uma estação base (fixa) e um

ou mais receptores móveis, por meio de um enlace de comunicação (normalmente rádio UHF ou protocolo de internet via celular - NTRIP).

Conforme salientou Monico (2008), o RTK permite a obtenção de coordenadas com precisão centimétrica no exato momento da coleta do ponto. Esta característica revolucionou os levantamentos topográficos e de georreferenciamento, uma vez que eliminou a etapa de processamento posterior e possibilitou a demarcação e a verificação de limites *in loco* com alta confiabilidade. A aplicação do RTK, contudo, enfrenta limitações relacionadas à distância entre a base e o *rover* (restrita a um raio de 10 a 20 km para alta precisão) e à dependência de infraestrutura local (instalação da base e link de comunicação), o que pode ser um obstáculo em regiões rurais extensas ou com conectividade precária (DRUMMOND, 2015).

1.3.4 Levantamentos com uso do sistema RTX: correções via satélite e autossuficiência em campo

A fronteira mais recente no posicionamento para georreferenciamento é representada pela tecnologia RTX (*Real Time eXtended*), um sistema de posicionamento por ponto preciso (PPP) em tempo real. Diferentemente do RTK convencional, o RTX dispensa completamente a necessidade de uma estação base local ou de uma infraestrutura de rede de referência (VRS) nas proximidades da área de levantamento. As correções orbitais, de relógio dos satélites e atmosféricas são calculadas por uma rede global de servidores de monitoramento e transmitidas diretamente ao receptor em campo via satélite geoestacionário ou conexão IP (internet).

De acordo com testes conduzidos no âmbito da agricultura de precisão, o desempenho do RTX aproxima-se significativamente do padrão RTK. Carballido *et al.* (2014), ao compararem ambas as tecnologias, constataram que o RTX alcança uma acurácia horizontal com desvio-padrão médio de aproximadamente 2,5 cm, valor plenamente compatível com as exigências normativas para o georreferenciamento de imóveis rurais. Adicionalmente, a evolução dos serviços de correção, como o Trimble Center Point RTX, incorporou o rastreamento de múltiplas constelações (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), o que reduziu o tempo de convergência para menos de cinco minutos em ambientes abertos e ampliou a disponibilidade do sinal em áreas parcialmente obstruídas.

A principal vantagem do RTX para o georreferenciamento de imóveis rurais reside em sua operacionalidade em áreas remotas, onde a logística para instalação de bases RTK é

complexa e a cobertura de redes de telefonia móvel é frequentemente inexistente ou instável. Estudo recente conduzido por Teixeira *et al.* (2025) na região de Ilhéus (BA) validou a técnica PPP-RTK (variação do conceito RTX) para fins de certificação fundiária junto ao INCRA, obtendo sigmas planimétricos mínimos de 0,008 m, superando com larga margem a tolerância de 0,50 m exigida pela autarquia. O estudo ressalvou, entretanto, que a cobertura vegetal densa ainda constitui um fator limitante, impactando o tempo de inicialização e a qualidade do sinal em ambientes de mata fechada.

O sistema RTX representa uma alternativa operacional promissora para levantamentos em áreas remotas, por reduzir a dependência de base física local. Entretanto, sua aplicação em georreferenciamento deve considerar tempo de convergência, condições de rastreio, obstruções, multicaminhamento e critérios normativos aplicáveis.

.

CAPÍTULO II

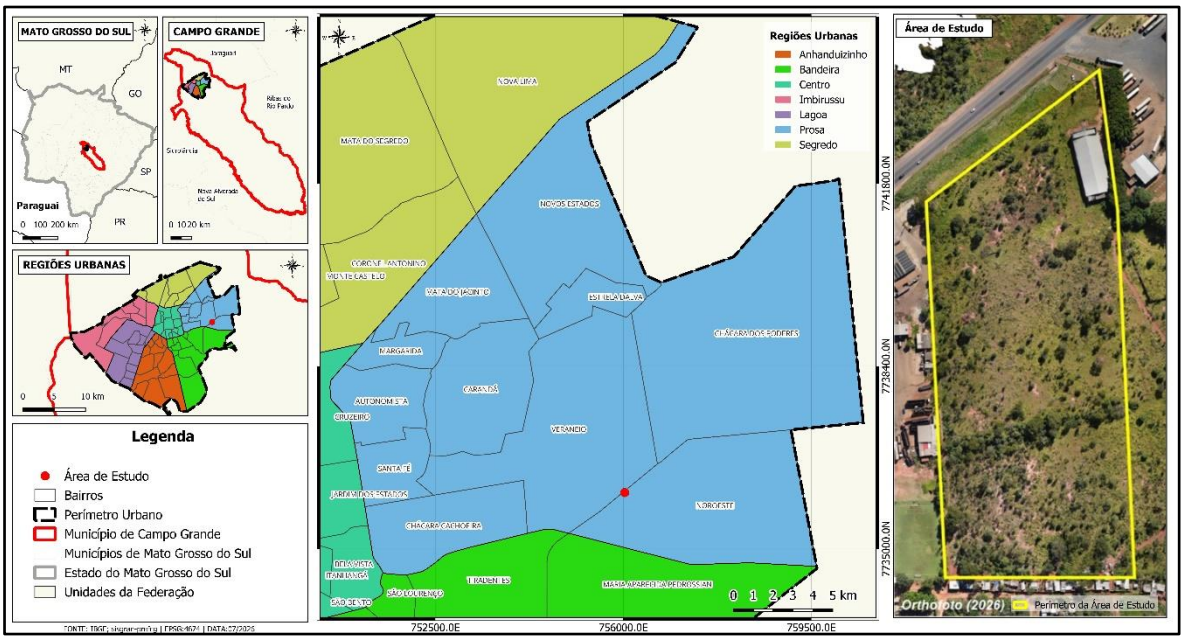
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A pesquisa foi realizada em uma área de estudo controlada, de fácil acesso, mas que retratasse as adversidades dos levantamentos de campo de georreferenciamento com Soluções GNSS em imóveis rurais.

A escolha da área de estudo ocorreu em função da existência de marcos materializados em campo, em sistema de referência SIRGAS2000, projeção UTM, fuso 21S, e da possibilidade de comparação entre diferentes tecnologias GNSS em um perímetro controlado, localizada no município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul, entre as Latitudes 20°27'21.43" e 20°27'35.34"S e Longitude 54°32'44.33" e 54°32'39.83"W, no perímetro urbano da cidade de Campo Grande - MS, no Bairro Noroeste (Figura 2).

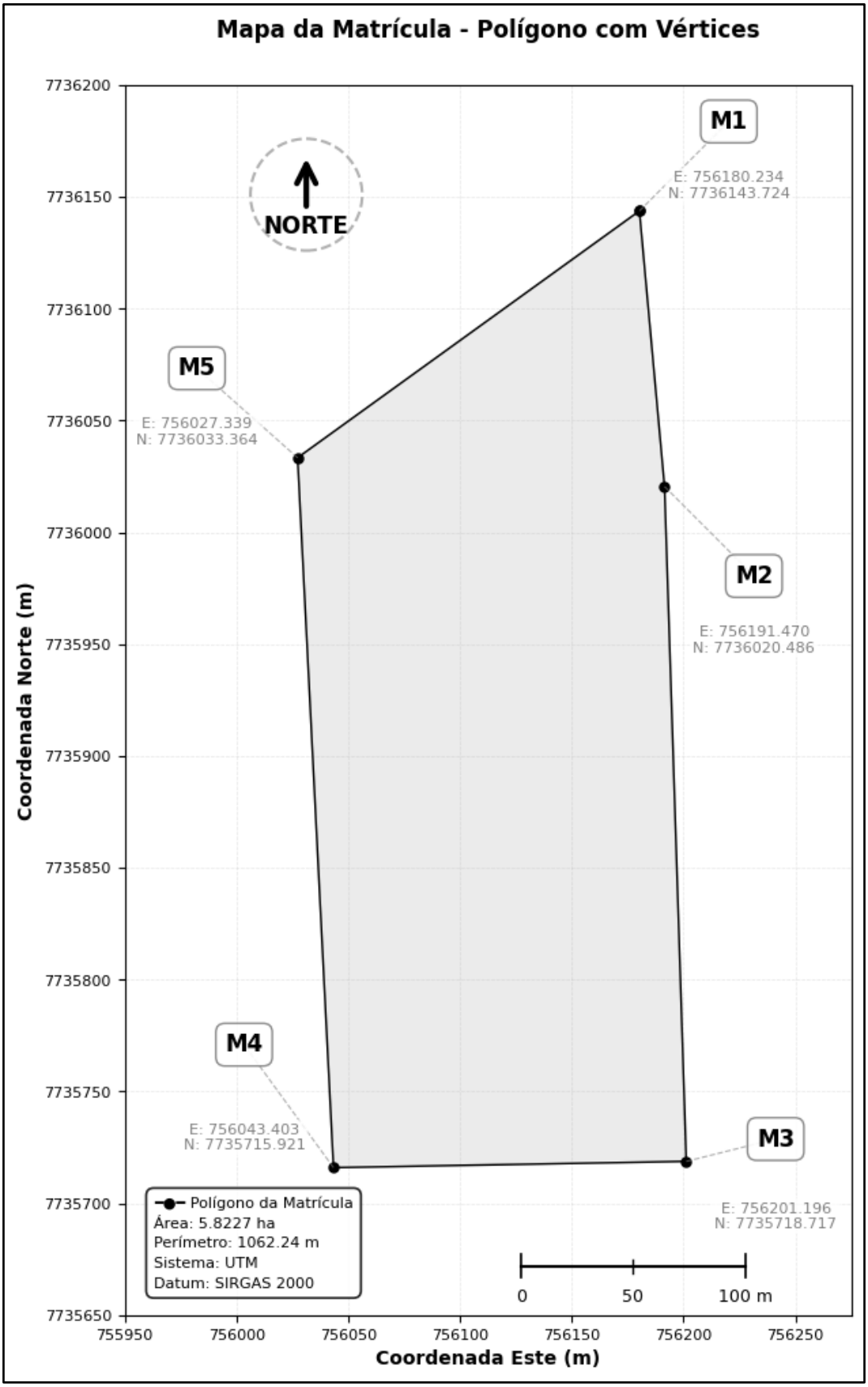
Figura 2: Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A partir dos dados da matrícula do imóvel foi utilizada como referência documental para comparação de área e perímetro, não sendo tratada, neste trabalho, como padrão absoluto de exatidão posicional, com área de 5,8227 ha e perímetro de 1062,24 metros (Figura 3). A área é delimitada por cercas e muros. Confronta ao Norte com o Anel Viário (Rua Castelnuovo); ao Sul com a Rua Confiança; a Leste com a Área 3 e com a Área 4; a Oeste com a Área B.

Figura 3: Mapa da Matrícula do Imóvel - área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

2.2 Procedimentos Metodológicos

Para cada levantamento, recomendou-se registrar os parâmetros de coleta adotados, incluindo intervalo de gravação, máscara de elevação, constelações rastreadas, tempo de ocupação por ponto, tipo de solução obtida e critérios de aceitação das coordenadas.

Como estratégia metodológica de controle das condições de rastreio, os levantamentos com as três tecnologias GNSS foram realizados no mesmo dia e em janelas temporais próximas para cada vértice da área de estudo. Essa decisão buscou reduzir a influência de variações temporais na disponibilidade das constelações de satélites, na geometria de rastreio e nas condições atmosféricas, especialmente aquelas associadas ao atraso ionosférico. Dessa forma, a comparação entre as soluções L1, L1/L2 e RTX foi conduzida sob condições ambientais e operacionais semelhantes, permitindo que as diferenças observadas nos resultados fossem atribuídas, prioritariamente, ao desempenho de cada tecnologia e não a mudanças significativas no cenário de rastreamento.

Embora os levantamentos não tenham ocorrido de forma exatamente simultânea, a realização sequencial e em curto intervalo temporal em cada vértice permitiu maior controle comparativo entre os métodos. Esse procedimento foi adotado para garantir que os receptores operassem sob condições semelhantes de visibilidade dos satélites, obstrução local, multicaminhamento e influência atmosférica, tornando a comparação mais consistente do ponto de vista metodológico.

2.2.1 Levantamento com receptor GNSS monofrequência L1

Para efetuar a primeira fase do levantamento geodésico foi utilizado a receptor GNSS monofrequência L1, a metodologia adotada foi o do posicionamento relativo estático com receptores GNSS de processamento restrito à frequência L1, visando atender aos objetivos específicos da pesquisa.

O trabalho de campo para o levantamento foi composto por uma estação de referência (base) e um receptor móvel (*rover*), ambos configurados para rastrear os sinais da constelação de satélites, com ênfase no código C/A e na fase da portadora L1.

O receptor fixo (base), GNSS Modelo GTRG2 (Foto 1), foi instalado sobre um ponto de coordenada conhecida MS01 (base geodésica), devidamente centrado e nivelado sobre tripé. O equipamento permaneceu em modo estático, coletando dados contínuos durante todo

o período de rastreamento, com taxa de gravação de 1 segundo e máscara de elevação de 15°, a fim de garantir a qualidade e a consistência dos dados para o pós-processamento.

Foto 1: Receptor Base - GNSS Modelo GTRG2

Fonte: Autores (2026)

Já o receptor móvel (*rover*), GNSS Modelo GTR-A (Foto 2), foi utilizado para o deslocamento e coleta dos vértice ao longo da área de estudo. Deste modo, o equipamento foi montado sobre bastão antena, com altura do polo devidamente medida e inserida no arquivo de dados, e configurado com os mesmos parâmetros de taxa de gravação e máscara de elevação da base para garantir a sincronia e a rastreabilidade do sinal.

Foto 2: Receptor Rover - GNSS Modelo GTR-A

Fonte: Autores (2026)

Por fim, o levantamento foi realizado por meio do método estático relativo, no qual os dois receptores (base e *rover*) rastrearam simultaneamente os satélites visíveis, registrando as observações da fase da portadora L1, com o tempo de ocupação pelo *rover*

em cada vértice (marco) pré-estabelecido em 15 minutos de rastreamento para a obtenção de coordenadas conforme a finalidade do estudo.

2.2.2 Levantamento com receptor GNSS de dupla frequência L1/L2

O segundo levantamento geodésico da área de estudo controlada foi realizado por meio do posicionamento relativo estático, utilizando receptores GNSS de dupla frequência, capazes de rastrear simultaneamente as portadoras L1 e L2. A adoção da dupla frequência visa minimizar os efeitos da ionosfera sobre o sinal, proporcionando maior acurácia e confiabilidade às coordenadas obtidas, especialmente em percursos com distâncias superiores a 10 km ou em condições atmosféricas adversas, os quais operam com as constelações GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, garantindo maior disponibilidade e robustez geométrica durante o rastreamento dos satélites.

A estação base utilizou um receptor GNSS Topcon HiperSR (Foto 3) instalado em um ponto estratégico (Base Local). Os dados brutos do rastreio foram armazenados para dupla finalidade: a determinação da coordenada precisa da base via serviço PPP-IBGE e a posterior correção dos pontos coletado pelo *rover* por posicionamento relativo pós-processado. O equipamento foi estacionado sobre tripé, com a altura do centro de fase da antena aferida e registrada em modo estático. A coleta de dados foi contínua, com taxa de gravação de 1 segundo e máscara de elevação de 15°, garantindo a qualidade para o pós-processamento.

Foto 3: Receptor Base - GNSS Topcon HiperSR - Portadoras L1/L2

Fonte: Autores (2026)

O segundo receptor Topcon HiperSR (Foto 4), foi utilizado *rover*, ou seja, receptor GNSS móvel. Assim, o receptor foi utilizado para o deslocamento e coleta dos pontos de

interesse na área de estudo. O equipamento foi montado sobre bastão antena, com altura do polo devidamente mensurada e anotada, e configurado com os mesmos parâmetros de taxa de gravação e máscara de elevação da base, garantindo a sincronia entre os receptores (base e *rover)*.

Foto 4: Receptor Rover - GNSS Topcon HiperSR - Portadoras L1/L2

Fonte: Autores (2026)

Para este levantamento, utilizou-se o método estático rápido. Dois receptores (base e *rover*) rastrearam simultaneamente os satélites visíveis, registrando as observáveis das fases das portadoras L1 e L2. Nos cincos marcos do perímetro, o receptor *rover* ocupou cada ponto por 10 minutos de rastreio. Esse tempo pré-fixado garantiu as coordenadas necessárias para os objetivos da pesquisa.

2.2.3 Levantamento com tecnologia RTX

Para a terceira fase de coleta dos dados posicionais, foi utilizada a tecnologia RTX (*Real-Time Extended*), uma solução de posicionamento absoluto de alta precisão baseada em correções orbitais e atmosféricas transmitidas via satélite ou internet, que dispensa a necessidade de uma estação base física instalada em campo, simplificando a logística operacional e eliminando as limitações de distância entre base e *rover* comuns aos métodos relativos convencionais.

O equipamento utilizado nesta etapa foi o receptor GNSS da marca Trimble, Modelo DA2 com o aplicativo Trimble Catalyst (Foto 5), módulo de comunicação que recebe as correções da rede de estações de referência da constelação de satélites, processando internamente as observáveis das portadoras e fornecendo coordenadas em tempo real com precisão compatível com levantamentos geodésicos e topográficos de alta acurácia.

Foto 5: Receptor Rover - GNSS da marca Trimble, Modelo DA2 - RTX

Fonte: Autores (2026)

O receptor Trimble DA2 foi ligado e configurado para operar no modo RTX pelo aplicativo Trimble Catalyst. O equipamento rastreia os satélites de forma automática e recebe as correções em tempo real. Em seguida, o sistema aguarda a estabilização do sinal, chamada de convergência, e avisa quando atinge a precisão desejada. Com o receptor montado sobre um bastão de altura conhecida, o operador aguarda o equipamento atingir a precisão fixa (RTK). Em seguida, inicia a coleta pelo aplicativo, que grava as coordenadas corrigidas do ponto em tempo real.

Diferentemente dos métodos convencionais de posicionamento relativo, que exigem um tempo mínimo de ocupação fixo, o levantamento com a tecnologia RTX é finalizado automaticamente pelo sistema. A coleta é encerrada no exato momento em que o equipamento atinge os critérios de precisão configurados. Dessa forma, não foi adotado um tempo médio pré-determinado, garantindo a qualidade da solução em cada ponto

2.2.4 Pós-processamento dos dados GNSS

Após a conclusão das atividades de campo, os dados brutos coletados nos levantamentos com os receptores GNSS monofrequência L1 (marca TechGeo e modelos GTRG2 e GTRA) e as portadorasL1/L2receptores GNSS de dupla frequência L1/L2 (marca Topcon e modelo HiperSR) foram submetidos ao processo de pós-processamento, etapa fundamental para a obtenção das coordenadas finais corrigidas e com a acurácia e validação dos pontos com soluções fixas e/ou flutuante necessária à pesquisa.

Para o pós-processamento dos pontos oriundos de ambos os levantamentos (L1 e L1/L2), foi utilizado o software TOPCON Tools (Figura 4), um aplicativo desenvolvido

especificamente para o processamento de dados GNSS, que oferece robustez na resolução de ambiguidades e no ajustamento de redes, além de ferramentas para análise da qualidade das soluções obtidas.

Figura 3: Software TOPCON Tools

Fonte: Autores (2026)

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados

3.1.1 Marcos de referência para levantamento com a coletora L1 e receptor GNSS de dupla frequência L1/L2

3.1.1.1 Levantamento L1 – Marco Geodésico

O levantamento com a coletora L1 teve como base o Marco MS-01, pertencente à Rede Geodésica de Mato Grosso do Sul e integrante da Rede GPS do Estado. Este marco está localizado a aproximadamente 1.960,00 m da área de estudo (Foto 6).

Foto 6: Marco MS-01, da Rede Geodésica de Mato Grosso do Sul

Fonte: Os autores (2026).

O marco MS-01 está localizado no Parque dos Poderes, próximo à rotatória em frente ao Comando Geral da Polícia Militar (Palácio Tiradentes), na cidade de Campo Grande – MS. Trata-se de um pilar de concreto com formato sextavado, altura total de 1,20 m (conjunto pilar e sapata) e sistema de centragem forçada com rosca de 5/8 de polegada, protegido por coifa rosqueável. Os dados desse marco estão disponíveis na plataforma online do IBGE (Figura 5).

Os dados do marco MS-01 estavam referenciados no datum SAD69. Para compatibilização com o sistema de coordenadas adotado no projeto, foi realizada a transformação para o SIRGAS2000, referencial geocêntrico adotado oficialmente no Brasil. Embora seja compatível com referenciais globais modernos, o SIRGAS2000 não deve ser tratado como simples equivalente absoluto ao WGS84. A transformação foi realizada por meio do software TOPCON Tools, utilizando o modelo de transformação de 7 parâmetros de Helmert (Tabela 1).

Figura 4: Dados da base o Marco MS-01, da Rede Geodésica MS

Fonte: Site do IBGE (2026).

Tabela 1: Coordenadas do marco MS-01 nos Datum SAD-69 e SIRGAS2000

PARÂMETRO	SAD-69	SIRGAS2000
Latitude (GMS)	-20° 26' 21,19812"	-20° 26' 22,82934"
Longitude (GMS)	-54° 33' 04,12700"	-54° 33' 05,94194"
Latitude (decimal)	-20,43922170	-20,43967482
Longitude (decimal)	-54,55114639	-54,55165054
Alt. Geométrica (m)	663,800	660,511
UTM E (m) – MC -57°	755.505,038	755.450,739
UTM N (m) – MC -57°	7.737.997,809	7.737.956,227
X cartesiano (m)	3.468.067,514	3.468.000,164
Y cartesiano (m)	-4.871.243,458	-4.871.239,578
Z cartesiano (m)	-2.213.564,541	-2.213.602,761

Fonte: Dados extraídos do arquivo Conversão MS01 SAD_SIRGAS.

3.1.1.2 Levantamento com receptor GNSS de dupla frequência L1/L2 – Marco Base de Referência

Para o levantamento com a portadora L1/L2, foi necessário implantação, nas proximidades da área de estudo, de um marco BASE local de referência (Foto 7).

Foto 7: Marco Base local de referência implantado com auxílio de receptor GNSS L1/L2

Fonte: Os autores (2026).

Os dados foram coletados por um período de 6 horas e 48 minutos (das 12:50:04 às 19:38:44, horário local), conforme consta no relatório de processamento do IBGE. Esse tempo de rastreio é suficiente para a fixação das coordenadas precisas, conforme recomendações do IBGE para levantamentos estáticos com receptor de dupla frequência.

O processamento dos dados coletados pela portadora L1/L2 foi realizado por meio da utilização do banco de dados do IBGE – Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), com processamento em modo estático, utilizando órbita ultra-rápida e frequência L3 (Figura 6).

Figura 5: Dados de processamento dos dados Marco local de referência (L1/L2)

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: log0519m

Início: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2026/05/19 12:50:04,00
Fim: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2026/05/19 19:38:44,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	NÃO DISPONÍVEL
Órbitas dos satélites:[1]	ULTRA-RÁPIDA
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s)**:**	1,00
Sigma[2] **da pseudodistância**(m)**:**	5,000
Sigma da portadora(m)**:**	0,010
Altura da Antena[3](m)**:**	1,600
Ângulo de Elevação(graus)**:**	10,000
Resíduos da pseudodistância(m)**:**	1,98 GPS 1,69 GLONASS
Resíduos da fase da portadora(cm)**:**	0,77 GPS 0,68 GLONASS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (E a que deve ser usada)[4]	-20° 27′ 23,9298″	-54° 32′ 41,1904″	666,78	7736065.926	756140.271	-57
Na data do levantamento[5]	-20° 27′ 23,9197″	-54° 32′ 41,1924″	666,78	7736066.238	756140.218	-57
Sigma(95%)[6] (m)	0,001	0,002	0,004			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA		
Fator para Conversão (m):	1,48	**Incerteza (m):**	0,07
Altitude Normal (m):	665,30		

Fonte: Relatório PPP do IBGE (2026).

Os resíduos obtidos no processamento foram:

- Pseudodistância: 1,98 m (GPS) e 1,69 m (GLONASS)
- Fase da portadora: 0,77 cm (GPS) e 0,68 cm (GLONASS)

As coordenadas finais obtidas no processamento via Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) no site do IBGE com datum SIRGAS2000 (Tabela 2).

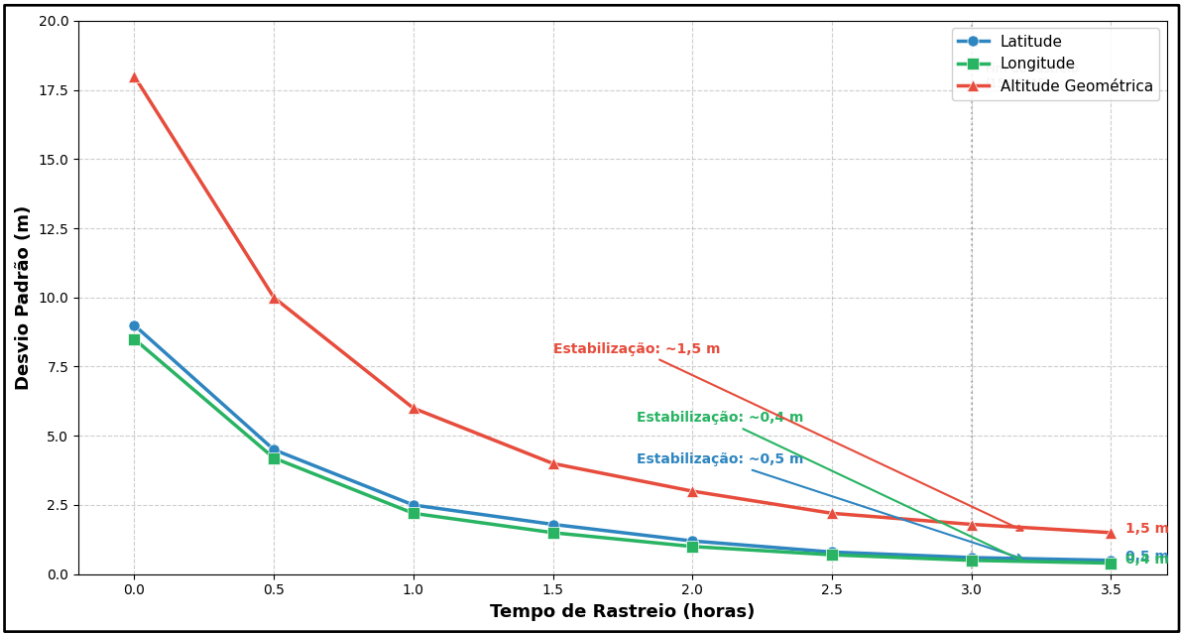
Tabela 2: Coordenadas obtidas via PPP (IBGE) para o marco implantado

PARÂMETRO	VALOR	SIGMA (95%)
Latitude (GMS)	-20° 27' 23,9298"	0,001 m
Longitude (GMS)	-54° 32' 41,1904"	0,002 m
Alt. Geométrica (h)	666,787 m	0,004 m
UTM N (m) – MC -57°	7.736.065,926	-
UTM E (m) – MC -57°	756.140,271	-

Fonte: Relatório PPP do IBGE (2026).

A altitude normal (ortométrica), obtida por conversão utilizando o modelo geoidal N_OR_IMBITUBA, com fator de conversão de 1,48 m, resultou no valor de 665,30 m (altitude). A evolução dos desvios padrão para as três componentes (latitude, longitude e altitude geométrica) ao longo do período de rastreio (Gráfico 1).

Gráfico 1: Evolução dos desvios Padrão das Coordenadas – Processamento PPP



Fonte: Relatório PPP do IBGE – Processamento do marco Base (2026).

Observa-se que, para todas as componentes, o desvio padrão, inicialmente elevado, reduz-se progressivamente nas primeiras 4 horas de rastreio, estabilizando-se em patamares consistentes a partir desse intervalo. A componente latitude estabilizou-se em aproximadamente 0,2 m, a longitude em 0,2 m e a altitude geométrica em 1,0 m ao final do

processamento. Conforme esperado a componente vertical apresentou o maior desvio padrão, refletindo a menor precisão inerente à determinação altimétrica.

A convergência das diferenças das coordenadas *a priori* para valores próximos de zero ao final do processamento corrobora a consistência dos dados e a confiabilidade das coordenadas obtidas para o marco local de referência.

A implantação e validação do marco base local por meio do serviço IBGE-PPP constitui etapa fundamental do estudo, pois fornece referência operacional para a comparação entre as soluções L1/L2 e RTX.

3.1.2 Levantamento da área de estudo com as diferentes tecnologias (L1; L1/L2 e RTX)

3.1.2.1 Levantamento com Coletora L1 – Modelo GTR-A

Os resultados obtidos a partir do levantamento de campo realizado com receptor GNSS monofrequência L1 nos cinco marcos da área de estudo têm como referência o vértice geodésico MS01, localizado no Parque dos Poderes, em Campo Grande – MS (Figura 7).

Figura 6: Imagens dos Marcos de rastreio com a Coletora L1- GTR-A

Marco Geodésico MS01 – Referência

Marco GTR-A - M1 – Vértice

Marco GTR-A - M2 – Vértice

Marco GTR-A - M3 – Vértice

Marco GTR-A - M4 – Vértice

Marco GTR-A - M5 – Vértice

Fonte: Os autores (2026).

Os dados coletados pela coletora L1 são as coordenadas brutas obtidas nos cinco marcos do perímetro da área de estudo (M1 a M5), além da base geodésica MS01 (Tabela 3), todas no sistema UTM (WGS84).

Tabela 3: Coordenadas UTM dos pontos M1 a M5 e da base geodésica

Ponto	Norte (m)	Este (m)	Elevação (m)	De - Para	Distância (m)
M01	7.736.142,044	756.181,477	667,842	M01 - M02	121,47
M02	7.736.021,276	756.194,518	672,396	M02 - M03	303,55
M03	7.735.717,818	756.201,991	666,695	M03 - M04	156,84
M04	7.735.716,397	756.045,157	663,269	M04 - M05	315,47
M05	7.736.027,860	756.026,090	672,760	M05 - M01	192,83
MS01	7.737.956,227	755.450,739	660,511	MS01 - M01	1.960,26

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados do levantamento (2026).

As distâncias entre marcos adjacentes variam de 121,47 m (entre M1 e M2) a 315,47 m (entre M4 e M5), evidenciando um perímetro irregular. A distância total percorrida entre os cinco marcos é de aproximadamente 1.090,26 m (121,47 + 303,55 + 156,84 + 315,47 + 192,83). A maior distância observada foi entre a base MS01 e o marco M1 (1.960,26 m), indicando que a base está localizada fora do perímetro dos vértices.

3.1.2.2 Levantamento com receptor GNSS de dupla frequência L1/L2 – Modelo HIPER SR

O levantamento com portadora GNSS de dupla frequência L1/L2receptor GNSS de dupla frequência L1/L2 foi realizado com uma portadora instala daum receptor GNSS instalado no Marco Base Local para o rastreio de referência e outro receptor para o levantamento do perímetro da área de estudo (Figura 8).

Figura 7: Imagens dos Marcos de rastreio com a tecnologia L1/L2 - HIPER SR

Marco Base Local – (HIPER SR)

Marco M1 – Vértice (HIPER SR)

Marco M2 – Vértice (HIPER SR)

Marco M1 – Vértice (HIPER SR)

Marco M4 – Vértice (HIPER SR)

Marco M5 – Vértice (HIPER SR)

Fonte: Os autores (2026).

Os dados brutos (Tabela 4) foram obtidos durante o rastreio dos vértices, ou seja, dos marcos M1, M2, M3, M4 e M5, e do Marco Base Local de referência por meio de receptores GNSS de dupla frequência L1/L2.

Tabela 4: Dados brutos de campo obtidos por receptores GNSS de dupla frequência L1/L2

Ponto	Norte (m)	Este (m)	Elevação (m)	De- Para	Distância (m)
M01	7.736.140,202	756.182,328	672.402	M01 - M02	119,58
M02	7.736.021,050	756.192,413	670.348	M02 - M03	303,03
M03	7.735.718,144	756.201,154	668.388	M03 - M04	157,75
M04	7.735.716,675	756.043,410	665.241	M04 - M05	318,55
M05	7.736.034,812	756.027,239	665.998	M05 - M01	187,51
BASE	7.736.066,094	756.140,326	667,47	Base - M01	85,18

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados do levantamento (2026).

Os resultados mostram as coordenadas planimétricas brutas (Norte e Este) e altimétricas (Elevação) de 6 pontos dos quais 5 pontos formam uma poligonal fechada (M01, M02, M03, M04 e M05), enquanto o ponto da Base é referente ao marco de referência do rastreio de satélites nas frequências L1 e L2. O perímetro de 1.086,42 m.

3.1.2.3 Levantamento com tecnologia RTX – Modelo DA2

Os resultados obtidos em tempo real com o equipamento RTX utiliza tecnologia que dispensa a utilização de base local, uma vez que a correção é feita em tempo real via satélite. Foram coletadas as coordenadas dos 5 vértices (M01, M02, M03, M04 e M05) do perímetro e do Marco Base Local (MB01) de referência (Figura 9).

Figura 8: Imagens dos Marcos de rastreio com a tecnologia RTX – DA2

Marco Base Local – (RTX DA2)

Marco M1 – Vértice (RTX DA2)

Marco M2 – Vértice (RTX DA2)

Marco M3 – Vértice (RTX DA2)

Marco M4 – Vértice (RTX DA2)

Marco M5 – Vértice (RTX DA2)

Fonte: Os autores (2026).

Os dados obtidos durante o levantamento com a tecnologia RTX são as coordenadas absolutas (Norte, Este e Elevação) coletadas para cada marco, bem como as distâncias calculadas entre eles (Tabela 5).

Tabela 5: Dados de campo obtidos pela tecnologia RTX – DA2

Ponto	Norte (m)	Este (m)	Elevação (m)	De- Para	Distância (m)
M01	7.736.142,622	756.180,558	667.937	M01 - M02	122,08
M02	7.736.021,134	756.192,555	668.724	M02 - M03	303,22
M03	7.735.718,041	756.201,152	665.843	M03 - M04	157,63
M04	7.735.716,662	756.043,524	661.729	M04 - M05	318,28
M05	7.736.034,532	756.027,398	663.337	M05 - M01	187,46
BASE	7.736.065,874	756.140,319	666.763	MB01 - M01	86,66

Fonte: Os autores (2026).

Os dados mostram que a poligonal levantada é composta por cinco vértice (M01 a M05), e a Base, o marco de referência.

As coordenadas planimétricas obtidas pela tecnologia RTX variaram entre os vértices do perímetro, com menor coordenada Norte no vértice M04 e maior coordenada Norte no vértice M01. A menor coordenada Este ocorreu no vértice M05 e a maior no vértice M03, mantendo coerência espacial com as demais soluções GNSS após a correção da identificação dos vértices M03 e M04.

Essa variação reflete a extensão da área levantada, com amplitude aproximada de 425,96 m na direção Norte-Sul e 173,75 m na direção Leste-Oeste. A distância total do perímetro é de 1.088,67 metros.

3.1.2.4 Síntese Comparativa das Distâncias entre as Tecnologias

Para facilitar a visualização e a comparação entre as três metodologias, apresenta-se um resumo das distâncias obtidas em campo entre marcos adjacentes e do perímetro total para cada solução (Tabela 6).

Tabela 4: Comparação das distâncias entre marcos (metros) por tecnologia

Segmento	L1 (GTR-A)	L1/L2 (HIPER SR)	RTX (DA2)
M01 - M02	121,47 m	119,58 m	122,08 m
M02 - M03	303,55 m	303,03 m	303,22 m
M03 - M04	156,84 m	157,75 m	157,63 m
M04 - M05	315,47 m	318,55 m	318,28 m
M05 - M01	192,83 m	187,51 m	187,46 m
Perímetro Total	**1.090,26 m**	**1.086,42 m**	**1.088,67 m**

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Observa-se que as distâncias totais calculadas apresentam pequenas variações entre os métodos, com diferença máxima de 3,84 m entre a tecnologia L1 (1.090,26 m) e L1/L2 (1.086,42 m), lembrando que esses dados são dados brutos de campo. Essas discrepâncias

são esperadas em levantamentos GNSS e refletem as diferentes estratégias de correção e processamento de cada solução.

A tecnologia L1/L2 apresentou o menor perímetro (1.086,42 m), enquanto a L1 apresentou o maior (1.090,26 m), sugerindo que o processamento com dupla frequência pode oferecer maior estabilidade na determinação das distâncias. O RTX apresentou perímetro intermediário (1.088,67 m), compatível com sua estratégia de correção em tempo real.

3.1.3 Parâmetros de Qualidade do Rastreio e Eficiência Operacional

Para aquisição dos dados, foram extraídas as métricas dos arquivos RINEX referentes às ocupações dos marcos do perímetro pela coletora L1 e pelo receptor GNSS L1/L2.

3.1.3.1 Coletora L1 – Modelo GTR-A

As métricas extraída dos arquivos RINEX referentes às ocupações dos marcos do perímetro pela coletora L1 (Tabela 7).

Tabela 5: Dados extraído do arquivo RINEX dos ocupado pela coletora L1

Marco	Tempo	Nº Satélites		Épocas	Obs. L1	Obs. C1 (C/A)	Taxa de Ocupação
M1	00:14:44	5	10	178	504	504	28,3%
M2	00:16:55	3	7	196	383	383	27,9%
M3	00:15:39	9	10	189	752	752	39,8%
M4	00:02:30	6	9	31	92	92	33,0%
M5	00:14:49	6	10	205	574	574	28,0%
MS01	01:29:40	6	11	1.077	7.772	7.772	65,6%

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados RINEX (2026).

O marco MS01 destacou-se pelo maior tempo de coleta (01:29:40), maior número de épocas (1.077) e maior taxa de ocupação (65,6%), além de apresentar o maior volume de observações nas frequências L1 e C/A (7.772 cada). Neste caso, o MS01 é o marco de referência para processamento dos dados coletados pela coletora L1 e esteve ligado durante todo o tempo de coleta pelo *rover* na área de estudo.

Em contrapartida, o marco M4 apresentou o menor tempo de ocupação (2min30s) e o menor número de observações (92 em L1 e C/A), e fato porque a base desligou durante o rastreio. Observa-se também que o marco M3 obteve o maior número de satélites rastreados (9 a 10), enquanto M2 registrou o menor (3 a 7). As taxas de ocupação para os marcos do perímetro variaram entre 27,9% (M2) e 39,8% (M3), indicando a qualidade das sessões de coleta.

3.1.3.2 Receptor GNSS L1/L2 – Modelo HIPER SR

Os dados obtidos durante o rastreio com o receptor GNSS L1/L2 incluem tempo de rastreio, quantidade de épocas (ciclos), número de satélites, total de observações e taxa de ocupação nas portadoras L1 e L2 (Tabela 8).

Tabela 6: Dados extraídos do arquivo RINEX das ocupações pela portadora L1/L2

Marco	Tempo	Nº Satélites		Ciclos	Obs. L1	Taxa de Ocupação	Obs. L2	Taxa de Ocupação
M1	00:10:26	7	13	627	3435	34,24%	3.161	31,51%
M2	00:10:27	7	11	628	2953	39,19%	2.631	34,91%
M3	00:10:26	11	14	627	3930	41,79%	3.915	41,63%
M4	00:10:20	17	18	621	5406	48,36%	5.402	48,33%
M5	00:10:26	11	15	627	4262	61,79%	4.075	59,08%
BASE	06:48:40	13	22	24.521	197.641	23,715%	195.794	23,48%

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados RINEX (2026).

O marco BASE apresentou tempo de rastreio de 6 horas, 48 minutos e 40 segundos, com variação de 13 a 22 satélites rastreados e 24.521 ciclos. As observações L1 totalizaram 197.641, enquanto as observações L2 somaram 195.794, resultando em taxas de ocupação de 23,715% e 23,48%, respectivamente.

Para os marcos do perímetro, os tempos de rastreio variaram entre 10 minutos e 20 segundos (M4) e 10 minutos e 27 segundos (M2). O número de satélites rastreados variou de 7 (M1 e M2) a 17 (M4), enquanto o número de ciclos variou de 621 (M4) a 628 (M2).

As observações L1 nos marcos do perímetro variaram de 2.953 (M2) a 5.406 (M4), com taxas de ocupação entre 34,24% (M1) e 61,79% (M5). Já as observações L2 variaram de 2.631 (M2) a 5.402 (M4), com taxas de ocupação entre 31,51% (M1) e 59,08% (M5).

3.1.3.3 RTX – Modelo DA2

Os parâmetros de qualidade do rastreio com a tecnologia RTX incluem o tempo de ocupação do ponto, o número de satélites rastreados e o PDOP (*Position Dilution of Precision*), que são indicadores para atestar a confiabilidade dos dados coletados (Tabela 9).

Tabela 7: Parâmetros de rastreio da tecnologia RTX – DA2

Marco	Tempo	Nº Satélites	PDOP
M1	00:01:49	22	1,2
M2	00:00:09	19	1,4
M3	00:00:09	22	1,1
M4	00:00:09	25	0,9
M5	00:00:09	26	0,9
BASE	00:00:09	11	2

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados do levantamento (2026).

Os parâmetros de rastreio demonstraram qualidade favorável dos dados coletados com a tecnologia RTX. O PDOP manteve-se entre 0,9 e 2,0, indicando geometria favorável dos satélites na maior parte dos pontos levantados. Os melhores valores ocorreram nos vértices M4 e M5, enquanto a Base apresentou PDOP igual a 2,0.

Destaca-se o curto tempo de ocupação da maioria dos pontos, com média de 9 segundos, evidenciando a eficiência operacional da tecnologia RTX. A exceção foi o vértice M1, que demandou 1 minuto e 49 segundos devido à cobertura das copas das árvores no local.

3.1.3.4 Comparação dos Parâmetros de Rastreio das diferentes tecnologias

Para visualização e compreensão do desempenho operacional de cada tecnologia, apresenta-se um resumo dos principais parâmetros de rastreio das três metodologias avaliadas (Tabela 10).

Tabela 8: Resumo dos parâmetros médios de rastreio por tecnologia

Parâmetro	L1 (GTR-A)	L1/L2 (HIPER SR)	RTX (DA2)
Tempo médio de rastreio (min)	12,9	10,4	0,3
Nº médio de satélites	7,4	10,6	22,8
Taxa média de ocupação (%)	31,4	45,1	–
PDOP médio	–	–	1,1

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Observa-se que a tecnologia RTX apresentou o menor tempo médio de rastreio (aproximadamente 0,3 minuto por marco) e o maior número médio de satélites rastreados (22,8), além do menor PDOP médio (1,1), indicando alta eficiência operacional. Em contrapartida, a coletora L1 apresentou o maior tempo médio de rastreio (12,9 minutos) e o menor número médio de satélites (7,4), o que pode impactar a qualidade das soluções obtidas. O receptor GNSS L1/L2 apresentou desempenho intermediário, com tempo médio

de 10,4 minutos e número médio de satélites de 10,6, além de taxas de ocupação médias superiores à tecnologia L1 (45,1% contra 31,4%).

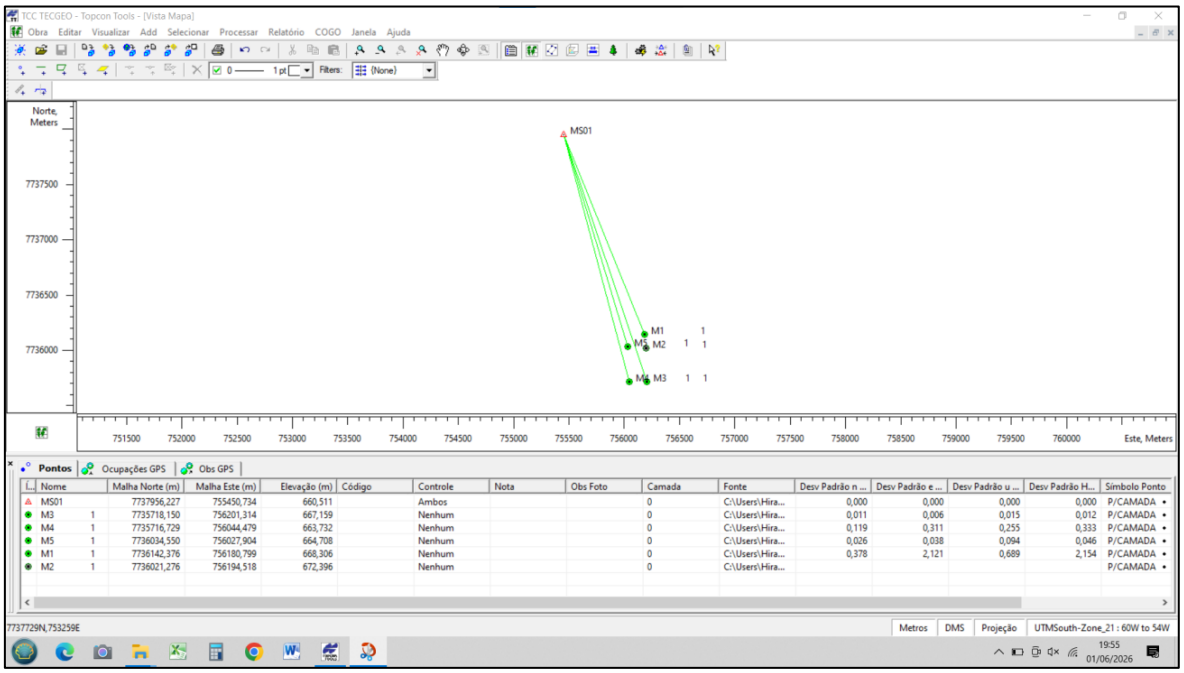
3.1.4 Pós-processamento dos Dados Brutos

O pós-processamento dos dados brutos corrige e refina as coordenadas coletadas em campo, convertendo observações GNSS em informações de maior precisão, por meio de marcos de referência e correções diferenciais aplicadas em software específico.

3.1.4.1 Pós-processamento dos dados brutos da coletora L1 – Modelo GTR-A

Para o processamento dos dados da coletora L1, os arquivos RINEX das coletoras da base e do *rover* foram utilizados em conjunto com as informações da base MS-01, já convertidas para o datum SIRGAS 2000. Foram incorporadas, ainda, as informações de altura e tipo de antena dos instrumentos registradas em campo. O processamento dos dados foi realizado no *software* TOPCON Tools (Figura 10).

Figura 9: Processamento dos dados L1 no *software* TOPCON Tools



Fonte: *Software* TOPCON Tools (2026).

Os dados processados por meio do *software* TOPCON Tools permitiram a obtenção das coordenadas corrigidas e os respectivos desvios padrão nas componentes Este (X), Norte (Y) e Elevação (Z) para os pontos e o marco de referência levantados na área de estudo (Tabela 11).

Tabela 9: Coordenadas corrigidas e desvios padrão – Coletora L1

Ponto	Malha Este (m)	Desvio Padrão (m)	Malha Norte (m)	Desvio Padrão (m)	Elevação (m)	Desvio Padrão (m)
M1 1	756.180,799	2,121	7.736.142,376	0,378	668,306	0,689
M2 1	756.193,134	0,279	7.736.021,199	0,088	670,703	0,389
M3 1	756.201,314	0,006	7.735.718,150	0,011	667,159	0,015
M4 1	756.044,479	0,311	7.735.716,729	0,119	663,732	0,255
M5 1	756.027,259	0,003	7.736.034,531	0,004	664,708	0,009
MS01	755450,734	0,000	7.737956,227	0,000	660,511	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados do *software* TOPCON Tools (2026).

O ponto de referência MS01 apresentou desvios padrão nulos em todos os componentes, indicando sua utilização como base de referência (ponto de controle) para o ajustamento das coordenadas coletadas na área de estudo.

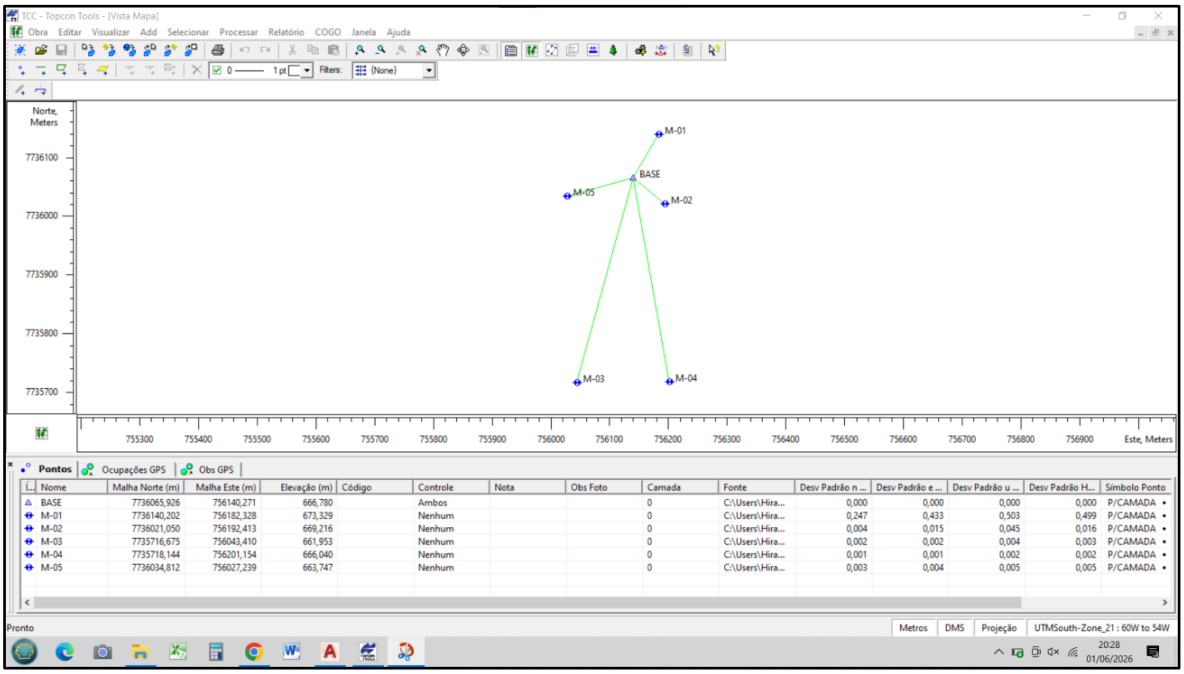
Entre os pontos de detalhe (M1 a M5), o ponto M1 apresentou a maior variação posicional, com desvio padrão de 2,121 m na componente Este e 0,689 m na elevação, sugerindo condições menos favoráveis durante sua coleta ou maior distância em relação à base. Em contrapartida, os pontos M3 e M5 obtiveram os melhores índices de precisão, com desvios padrão milimétricos (0,006 m e 0,003 m para Este, respectivamente), refletindo condições ideais de rastreamento e geometria dos satélites durante a coleta.

3.1.4.2 Pós-processamento dos dados brutos do recepor GNSS L1/L2 - Modelo HIPER SR

Para o levantamento com equipamento de dupla frequência L1/L2, foi necessária a implantação de uma base no local (BASE). As coordenadas absolutas dessa base foram determinadas por meio do serviço PPP-IBGE, permitindo a sua utilização como referência no processamento relativo dos vértices levantados.

O *software* TOPCON Tools foi utilizado para processar os dados coletados, apresentando a disposição relativa dos pontos processados (Figura 11).

Figura 10: Processamento dos dados do receptor GNSS L1/L2 no *software* TOPCON Tools



Fonte: *Software* TOPCON Tools (2026).

Os dados processados pelo software TOPCON Tools, coletados com receptores GNSS de dupla frequência L1/L2 (Tabela 12), contêm os valores finais de coordenadas planimétricas (Este e Norte) e altimétricas (Elevação), acompanhados de seus respectivos desvios padrão, indicadores da precisão obtida para cada ponto levantado.

Tabela 10: Dados processados pelo *software* TOPCON Tools - Receptor GNSS L1/L2

Ponto	Malha Este (m)	Desvio Padrão (m)	Malha Norte (m)	Desvio Padrão (m)	Elevação (m)	Desvio Padrão (m)
M01	756.182,328	0,433	7.736.140,202	0,247	673,329	0,503
M02	756.192,413	0,015	7.736.021,050	0,004	669,216	0,045
M03	756.201,154	0,001	7.735.718,144	0,001	666,040	0,002
M04	756.043,410	0,002	7.735.716,675	0,002	661,953	0,004
M05	756.027,239	0,004	7.736.034,812	0,003	663,747	0,005
BASE	756.140,271	0,000	7.736.065,926	0,000	666,780	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do *software* TOPCON Tools (2026).

O ponto da BASE, utilizado como referência para o processamento, apresenta desvio padrão nulo nas três componentes, como esperado por se tratar do ponto de controle fixo.

Os demais pontos (M-01 a M-05) apresentam variações nos desvios padrão, com destaque para o ponto M-01, que registrou os maiores valores (0,433 m para a coordenada

Este, 0,247 m para Norte e 0,503 m para Elevação), sugerindo condições menos favoráveis durante sua coleta.

Por outro lado, os pontos M-03 e M-04 apresentaram os menores desvios padrão (0,002 m e 0,001 m, respectivamente, para as componentes Este e Norte), indicando alta repetibilidade e consistência no processamento dos receptores GNSS L1/L2 para essas posições. Em geral, os dados demonstraram que a maioria dos pontos atingiu precisão submétrica, com vários deles alcançando níveis centimétricos ou milimétricos, conforme os desvios padrão apresentados.

3.1.4.3 Pós-processamento dos dados da tecnologia RTX – Modelo DA2

Na tecnologia RTX, não há pós-processamento, uma vez que as coordenadas são obtidas em tempo real por meio de correção via satélite, dispensando qualquer processamento adicional em escritório (Tabela 5, pg. 36).

3.1.4.4 Síntese das Coordenadas Processadas por Tecnologia

A análise comparativa das coordenadas finais obtidas por cada tecnologia, após as correções e conferências aplicadas (Tabela 13).

Tabela 11: Resumo das coordenadas finais por tecnologia – L1, L1/L2 e RTX

Ponto	Coordenadas	L1 (GTR-A)	L1/L2 (HIPER SR)	RTX (DA2)
M1	Este (m)	756.180,799	756.182,328	756.180,558
	Norte (m)	7.736.142,376	7.736.140,202	7.736.142,622
	Elevação (m)	668,306	673,329	667,937
M2	Este (m)	756.193,134	756.192,413	756.192,555
	Norte (m)	7.736.021,199	7.736.021,050	7.736.021,134
	Elevação (m)	670,703	669,216	668,724
M3	Este (m)	756.201,314	756.043,410	756.043,524
	Norte (m)	7.735.718,150	7.735.716,675	7.735.716,662
	Elevação (m)	667,159	661,953	661,729
M4	Este (m)	756.044,479	756.201,154	756.201,152
	Norte (m)	7.735.716,729	7.735.718,144	7.735.718,041
	Elevação (m)	663,732	666,040	665,843
M5	Este (m)	756.027,259	756.027,239	756.027,398
	Norte (m)	7.736.034,531	7.736.034,812	7.736.034,532
	Elevação (m)	664,708	663,747	663,337

Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados processados (2026).

3.1.5 Análise de precisão e erro horizontal das soluções GNSS

Além dos valores numéricos de precisão e erro horizontal, foi avaliado o status da solução obtida no pós-processamento, considerando a ocorrência de soluções fixas ou flutuantes. Esse critério é relevante porque uma solução flutuante indica maior incerteza na resolução das ambiguidades da fase da portadora, podendo comprometer a confiabilidade da coordenada final, especialmente em vértices sujeitos à obstrução por vegetação, edificações ou multicaminhamento.

3.1.5.1 Precisão das soluções — desvios padrão

O erro horizontal corresponde à distância planimétrica entre a coordenada obtida no levantamento GNSS e a coordenada adotada como referência, calculada a partir das diferenças entre as componentes Norte e Este. Já a precisão horizontal expressa a dispersão interna da solução, calculada a partir dos desvios padrão das componentes Norte e Este. Portanto, precisão horizontal e erro horizontal não devem ser tratados como sinônimos.

3.1.5.1.1 Solução L1 – Coletora GTR-A

Os dados dos desvios padrão obtidos para a solução L1 (Tabela 14) foram avaliados em cada um dos vértices levantados, incluindo a base local. Os desvios padrão refletem a dispersão das coordenadas em torno do valor médio, sendo indicadores diretos da precisão do posicionamento. A precisão horizontal foi calculada a partir do RMS 2D dos desvios padrão das componentes Norte e Este.

Tabela 12: Desvios padrão e precisão horizontal – Solução L1

Vértice	σ Norte (m)	σ Este (m)	Precisão Horizontal (m)	Solução
M1	0,378	2,121	2,154	Flutuante
M2	0,088	0,279	0,292	Flutuante
M3	0,011	0,006	0,013	Fixa
M4	0,119	0,311	0,333	Flutuante
M5	0,004	0,003	0,005	Fixa
BASE	0,023	0,044	0,050	Fixa

Fonte: Elaborado pelos autores a partir do processamento no *software* TOPCON Tools (2026).

A solução L1 apresentou desvios padrão variando entre 0,003 m (Este – M5) e 2,121 m (Este – M1). O vértice M1 destacou-se com o maior desvio padrão em ambas as componentes (0,378 m em Norte e 2,121 m em Este), resultando na maior precisão horizontal (2,154 m). Em contrapartida, os vértices M3 e M5 apresentaram os melhores índices de precisão, com valores milimétricos (0,013 m e 0,005 m, respectivamente), indicando

condições favoráveis de rastreamento durante a coleta. A Base apresentou precisão horizontal de 0,050 m, compatível com sua função de referência.

3.1.5.1.2 Solução L1/L2 – Portadora HIPER SR

Os desvios padrão obtidos para a Solução L1/L2 em cada um dos vértices levantados, incluindo a base local. Assim como na Solução L1, a precisão horizontal foi calculada a partir do RMS 2D dos desvios padrão das componentes Norte e Este (Tabela 15).

Tabela 13: Desvios padrão e precisão horizontal – Solução L1/L2

Vértice	σ Norte (m)	σ Este (m)	Precisão Horizontal (m)	Solução
M1	0,247	0,433	0,498	Flutuante
M2	0,004	0,015	0,016	Fixa
M3	0,002	0,002	0,003	Fixa
M4	0,001	0,001	0,001	Fixa
M5	0,003	0,004	0,005	Fixa
BASE	0,001	0,002	0,002	Fixa

Fonte: Elaborado pelos autores a partir do processamento no *software* TOPCON Tools (2026).

A solução L1/L2 apresentou desvios padrão significativamente menores em comparação à solução L1, com valores variando entre 0,001 m (componentes Norte e Este – M4) e 0,433 m (Este – M1). O vértice M1 novamente registrou o maior desvio padrão (0,498 m de precisão horizontal), embora em magnitude muito inferior à observada na solução L1.

3.1.5.1.3 Solução RTX – Modelo DA2

Na solução RTX, foram obtidos os dados dos desvios padrão para cada vértice levantado, incluindo a Base. Diferentemente das soluções L1 e L1/L2, o RTX não depende de pós-processamento, de modo que os desvios padrão refletem a repetibilidade das coordenadas obtidas em tempo real durante a coleta em campo (Tabela 16).

Tabela 14: Desvios padrão e precisão horizontal – Solução RTX

Vértice	σ Norte (m)	σ Este (m)	Precisão Horizontal (m)
M1	0,017	0,021	0,027
M2	0,029	0,021	0,036
M3	0,022	0,023	0,032
M4	0,013	0,013	0,018
M5	0,026	0,024	0,035
BASE	0,047	0,054	0,072

Fonte: Elaborado pelos autores a partir do processamento no *software* TOPCON Tools (2026).

A solução RTX apresentou desvios padrão variando entre 0,013 m (M4) e 0,054 m (Base – Este). O vértice M4 registrou o melhor índice de precisão horizontal (0,018 m), enquanto a Base apresentou o maior valor (0,072 m), possivelmente devido ao curto tempo de ocupação (9 segundos). Os demais vértices apresentaram precisão horizontal entre 0,027 m (M1) e 0,036 m (M2), demonstrando alta homogeneidade nos resultados de precisão interna.

3.1.5.2 Análise Comparativa da Precisão entre as Soluções

A comparação direta da precisão horizontal obtida para cada vértice em cada tecnologia, acompanhada das respectivas médias e medianas das três soluções avaliadas. A análise comparativa permite identificar padrões de desempenho e avaliar a consistência de cada método em diferentes condições de coleta (Tabelas 17).

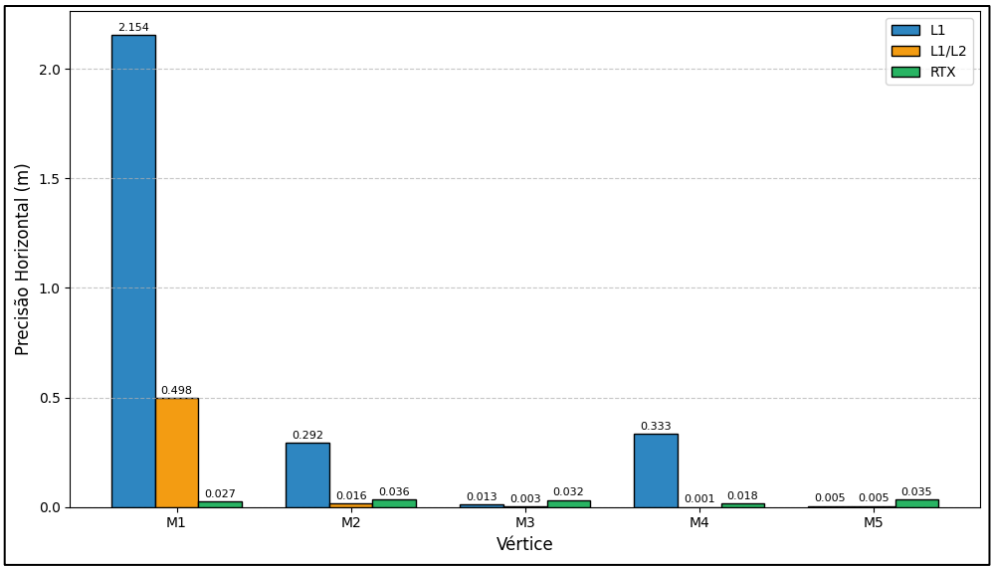
Tabela 15: Comparação da precisão horizontal (m) por solução e vértice

Vértice	L1 (GTR-A)	L1/L2 (HIPER SR)	RTX (DA2)
M1	2,154	0,498	0,027
M2	0,292	0,016	0,036
M3	0,013	0,003	0,032
M4	0,333	0,001	0,018
M5	0,005	0,005	0,035
Média	**0,559**	**0,105**	**0,030**
Mediana	**0,292**	**0,005**	**0,032**

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A comparação da precisão horizontal obtida para cada tecnologia nos diferentes vértices (Gráfico 2).

Gráfico 2: Comparação da precisão horizontal (RMS 2D) por tecnologia e vértice



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Solução L1 apresentou a maior variabilidade nos resultados, com precisão horizontal variando de 0,005 m (M5) a 2,154 m (M1), resultando em uma média de 0,559 m. Essa amplitude expressiva indica que a Solução L1 é mais sensível às condições de rastreamento e à geometria dos satélites.

A Solução L1/L2 apresentou precisão horizontal média de 0,105 m, com valores variando entre 0,001 m (M4) e 0,498 m (M1). A mediana de 0,005 m indica que a maioria dos vértices atingiu precisão milimétrica, com exceção do vértice M1.

A solução RTX apresentou a menor média (0,030 m) e a menor amplitude entre os valores (0,018 m a 0,036 m para os vértices do perímetro), demonstrando alta consistência e homogeneidade quanto à precisão interna. Essa interpretação não deve ser confundida com erro horizontal em relação a uma referência externa.

3.1.6 Comparação dos Resultados Geométricos (Área e Perímetro) com os Dados da Matrícula

A comparação entre os resultados geométricos obtidos pelas diferentes soluções GNSS e os dados constantes na matrícula do imóvel constitui uma etapa importante para avaliar a aderência documental dos levantamentos realizados. Entretanto, a matrícula deve ser tratada como referência documental e legal, não necessariamente como verdade geométrica absoluta do terreno.

Assim o comparativo dos valores de área e perímetro obtidos para cada Solução (L1 pré e pós-processado, L1/L2 pré e pós-processado, e RTX), em confronto com os dados da matrícula (Tabela 18).

Tabela 16: Comparação de área e perímetro entre as soluções GNSS e a matrícula

Solução	Área (ha)	Perímetro (m)	ΔÁrea (ha)	Δ Área (%)	ΔPerímetro (m)	ΔPerímetro (%)
L1 – Pré-processado	5,8385	1.086,44	+0,0158	+0,27	+24,20	+2,28
L1 – Pós-processado	5,9180	1.076,79	+0,0953	+1,64	+14,55	+1,37
L1/L2 – Pré-processado	5,9811	1.089,91	+0,1584	+2,72	+27,67	+2,60
L1/L2 – Pós-processado	5,9831	1.086,42	+0,1604	+2,75	+24,18	+2,28
RTX – Tempo Real	5,9987	1.088,67	+0,1760	+3,02	+26,43	+2,49
Matrícula	**5,8227**	**1.062,24**	–	–	–	–

Fonte: Elaborado pelos autores a partir da matrícula e dos levantamentos GNSS (2026).

Os dados da matrícula indicam área de 5,8227 ha e perímetro de 1.062,24 m. Todas as soluções GNSS apresentaram áreas e perímetros superiores aos da matrícula, com

variações que refletem as diferentes estratégias de correção e processamento empregadas, bem como possíveis diferenças entre a geometria documental e a geometria levantada em campo.

3.1.6.1 Análise da Área de Estudo

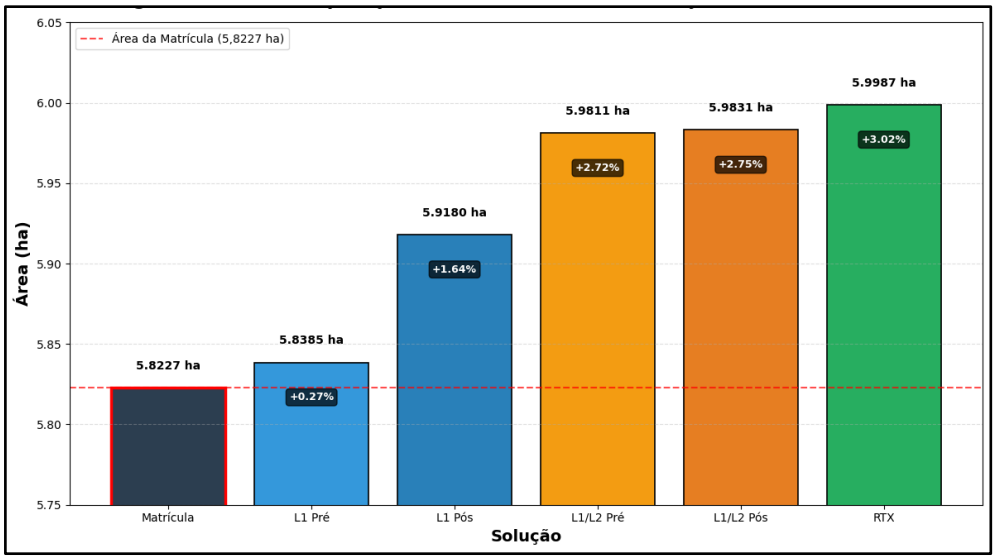
As diferenças de área entre as Soluções GNSS e a Matrícula variaram significativamente (Tabela 19 e Gráfico 3).

Tabela 17: Diferenças de área por solução em relação à matrícula

Solução	ΔÁrea (ha)	ΔÁrea (%)
L1 – Pré-processado	+0,0158	+0,27
L1 – Pós-processado	+0,0953	+1,64
L1/L2 – Pré-processado	+0,1584	+2,72
L1/L2 – Pós-processado	+0,1604	+2,75
RTX – Tempo Real	+0,1760	+3,02

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Gráfico 3: Comparação da área (ha) entre as soluções GNSS e a matrícula



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Solução L1 pré-processada apresentou a menor diferença em relação à Matrícula (apenas 0,27%), o que, à primeira vista, poderia sugerir melhor desempenho. No entanto, essa proximidade numérica deve ser interpretada com cautela, pois a Solução L1 apresentou os maiores erros horizontais (precisão média de 0,559 m e erros sistemáticos superiores a 3.900 m), indicando que a coincidência com o valor da Matrícula pode ser fortuita e não resultante de maior exatidão, fenômeno conhecido na literatura como "erro de cancelamento" (Monico, 2008).

Já a solução L1 pós-processada apresentou diferença intermediária de 1,64%, enquanto as soluções L1/L2 e RTX apresentaram diferenças entre 2,72% e 3,02%. Esses valores devem ser interpretados como divergências entre o levantamento atual e a referência documental da matrícula, e não como prova isolada de erro do documento cartorial ou superioridade absoluta de uma tecnologia.

3.1.6.2 Análise do Perímetro

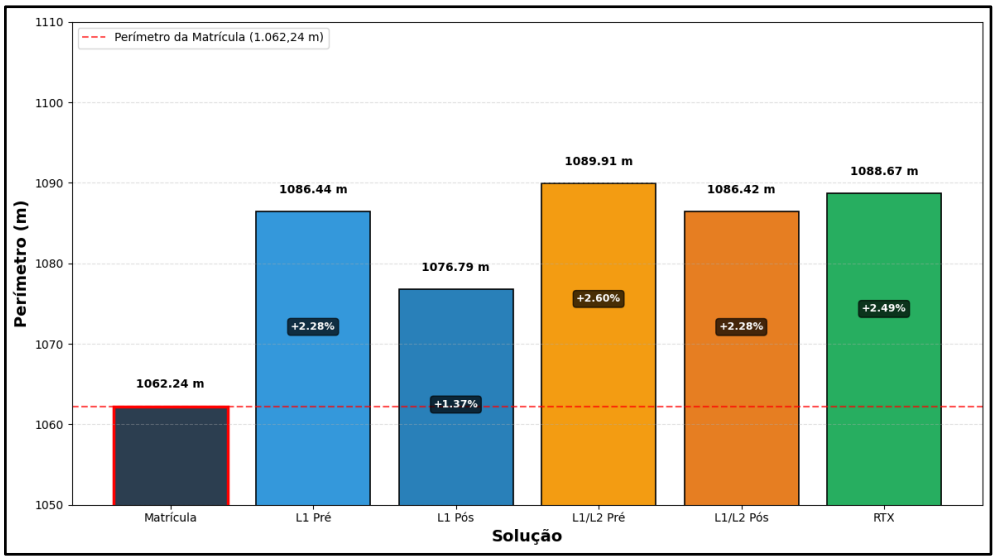
Em relação ao perímetro, os valores oscilaram entre 1.076,79 m (Solução L1 pós-processado) e 1.089,91 m (L1/L2 pré-processado). As diferenças em relação à Matrícula variaram entre 14,55 m (Solução L1 pós-processado) e 27,67 m (Solução L1/L2 pré-processado), correspondendo a acréscimos percentuais de 1,37% a 2,60%, (Tabela 20 e Gráfico 4).

Tabela 18: Diferenças de perímetro por solução em relação à matrícula

Solução	ΔPerímetro (m)	ΔPerímetro (%)
L1 – Pré-processado	+24,20	+2,28
L1 – Pós-processado	+14,55	+1,37
L1/L2 – Pré-processado	+27,67	+2,60
L1/L2 – Pós-processado	+24,18	+2,28
RTX – Tempo Real	+26,43	+2,49

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Gráfico 4: Comparação do perímetro (m) entre as Soluções GNSS e a Matrícula



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.1.6.3 Efeito do Pós-processamento sobre a Geometria da Poligonal

Um aspecto relevante observado nos resultados é o efeito do pós-processamento sobre os parâmetros geométricos de cada Solução (Tabela 21).

Tabela 19: Efeito do pós-processamento sobre a área e o perímetro

Solução	Pré-processado	Pós-processado	Δ (Pós – Pré)
L1 – Área (ha)	5,8385	5,9180	+0,0795
L1 – Perímetro (m)	1.086,44	1.076,79	-9,65
L1/L2 – Área (ha)	5,9811	5,9831	+0,0020
L1/L2 – Perímetro (m)	1.089,91	1.086,42	-3,49

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O pós-processamento aumentou a área em ambas as Soluções (Solução L1: +0,0795 ha; L1/L2: +0,0020 ha), indicando que as correções aplicadas tenderam a expandir a poligonal. Esse efeito foi mais pronunciado na Solução L1, que é mais suscetível a erros sistemáticos. Ao mesmo tempo, o pós-processamento reduziu o perímetro em ambas as Soluções (Solução L1: -9,65 m; Solução L1/L2: -3,49 m), sugerindo que o ajuste refinou a geometria, eliminando pequenas inconsistências angulares e lineares.

Assim, o efeito do pós-processamento foi mais pronunciado na Solução L1 do que na Solução L1/L2, o que era esperado, pois a solução monofrequência é mais suscetível a erros que podem ser parcialmente corrigidos no processamento.

3.2 Discussão dos Resultados

A presente pesquisa teve como objetivo analisar o desempenho técnico e operacional de três metodologias de correção GNSS: (a) pós-processamento com frequência L1; (b) pós-processamento com dupla frequência L1/L2; e (c) serviço de correção em tempo real RTX. A comparação foi realizada em área controlada, com cinco vértices, buscando avaliar precisão, exatidão, eficiência operacional e aderência geométrica em relação à matrícula.

3.2.1 Tempo de Ocupação, Produtividade em Campo e Relação com a Qualidade dos Dados

Os resultados demonstraram diferenças expressivas no tempo médio de rastreio entre as tecnologias avaliadas. A tecnologia RTX destacou-se com o menor tempo médio de ocupação por marco (aproximadamente 0,3 minuto), enquanto a Solução L1 apresentou o maior tempo médio (12,9 minutos), com a Solução L1/L2 ocupando posição intermediária (10,4 minutos).

Essa diferença tem implicações operacionais significativas em levantamentos de grande escala. Em áreas com dezenas ou centenas de pontos, a economia de tempo proporcionada pelo RTX pode representar redução expressiva de deslocamentos, tempo de campo e custos operacionais.

O tempo reduzido do RTX (média de 9 segundos por ponto) está diretamente relacionado à sua tecnologia de correção via satélite, que dispensa a instalação de base local e o pós-processamento. Em contrapartida, os métodos que exigem pós-processamento (Soluções L1 e L1/L2) demandam tempos de ocupação mais longos para garantir a qualidade dos dados, especialmente em condições de baixa visibilidade de satélites ou caminho múltiplo (*multipath*).

Embora o RTX tenha apresentado maior produtividade em campo, o desempenho da tecnologia não deve ser avaliado apenas pelo tempo de coleta. A qualidade do resultado também depende das condições locais de rastreio, da visibilidade do céu, da presença de cobertura vegetal, do multicaminhamento e do tempo de convergência da solução.

Nesse sentido, na área de estudo controlada foi possível observar que as soluções aplicadas, mesmo com tempo de rastreio delimitado para a frequência L1 (15 minutos) e para a dupla frequência L1/L2 (10 minutos), apresentaram comportamentos distintos quanto à fixação das soluções e à precisão horizontal.

Esses padrões distintos evidenciam que, na solução L1, o período de rastreio foi satisfatório apenas para os marcos M3 e M5, com tempos de 15 minutos e 39 segundos e 14 minutos e 49 segundos, respectivamente. Ambos apresentaram solução fixa, indicando maior estabilidade posicional em comparação aos demais vértices.

Em contrapartida, os marcos M1, M2 e M4 apresentaram solução flutuante, com precisões horizontais mais elevadas, evidenciando a fragilidade da solução monofrequência L1 em condições adversas. O vértice M1 apresentou o pior desempenho, associado à obstrução vegetal e possível multicaminhamento.

Já o vértice M2 apresentou erro de 0,292 m, enquanto M4, com apenas 2 minutos e 30 segundos de rastreio (interrompido por falha na base), apresentou erro de 0,333 m. Este último caso é particularmente relevante, pois a falha na base só pôde ser identificada no momento do pós-processamento, ressaltando a importância do monitoramento contínuo em campo e da verificação dos dados ainda durante a coleta.

É importante destacar que, mesmo com tempos de rastreio de 14 minutos e 44 segundos (M1) e 16 minutos e 55 segundos (M2), a Solução L1 para esses vértices permaneceram flutuantes, evidenciando que fatores externos, como a cobertura vegetal, têm influência decisiva na qualidade do processamento, superando, em alguns casos, a própria variável tempo. Esse comportamento está alinhado com a literatura, que destaca que a relação sinal-ruído e a geometria dos satélites são fatores críticos para a resolução de ambiguidades, especialmente em receptores mono frequência L1 (MONICO, 2008).

Já a solução L1/L2 apresentou resultados mais consolidados. Os vértices M2, M3, M4 e M5 apresentaram soluções fixas, com precisões horizontais variando de 0,001 m a 0,016 m, demonstrando a superioridade da dupla frequência na mitigação de erros em comparação à solução monofrequência L1.

A solução RTX comportou-se de forma mais homogênea nos vértices M2, M3, M4 e M5, com tempo de ocupação de aproximadamente 9 segundos e precisão horizontal variando de 0,018 m a 0,036 m. No vértice M1, sob condição adversa de cobertura vegetal, o tempo de ocupação foi maior, evidenciando que mesmo a tecnologia RTX pode sofrer influência de obstruções locais.

Ao comparar os vértices M1 (sob copa de árvores) e M3 (céu aberto), é possível compreender o impacto da cobertura vegetal sobre as diferentes tecnologias (Figura 12). A

comparação evidencia que ambientes com obstrução tendem a aumentar a incerteza posicional, especialmente nas soluções dependentes de pós-processamento.

Figura 11: Condições adversas no rastreio nas diferentes tecnologias

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

As imagens evidenciam que parte dos vértices foi ocupada em condições desfavoráveis de rastreio, com presença de vegetação, obstáculos laterais e possível multicaminhamento. Essas condições ajudam a explicar a degradação da qualidade posicional em pontos específicos, especialmente no vértice M1.

3.2.2 Número de Satélites e Qualidade da Geometria

A solução RTX apresentou o maior número médio de satélites rastreados (22,8), contra 10,6 da solução L1/L2 e 7,4 da solução L1. Dessa forma, a qualidade da solução GNSS está diretamente relacionada à disponibilidade de satélites, à geometria de rastreio e à capacidade do receptor de manter solução estável em condições adversas.

Dessa forma, os valores de PDOP (*Position Dilution of Precision*), com média de 1,1 obtida pela solução RTX, refletiram boa geometria dos satélites durante o levantamento, favorecendo maior robustez posicional.

Já a Solução L1/L2 com taxa média de 10,6 satélites durante o rastreio dos vértices apresentou desempenho intermediário, com PDOP não calculado diretamente, com número de satélites rastreados pela dupla frequência, embora inferior ao do RTX, foi suficiente para garantir a resolução fixa das ambiguidades na maioria dos vértices, com exceção do M1 presentou Solução Flutuante, evidenciando que a combinação de dupla frequência com geometria adequada é capaz de produzir resultados centimétricos a milimétricos.

No entanto, o vértice M1 revela uma limitação importante da solução L1/L2, pois apresentou solução flutuante no pós-processamento. Esse comportamento não deve ser

atribuído apenas à tecnologia, mas também às condições locais de coleta, como obstrução vegetal, multicaminhamento e redução da visibilidade do céu.

Em contrapartida, a Solução L1, com menor número de satélites (7,4), ficou sujeita aos efeitos de degradação da qualidade do sinal, especialmente em áreas com obstruções de vegetação. O vértice M2, por exemplo, rastreou apenas 3 a 7 satélites, resultando em Solução Flutuante com erro de 0,292 m. O vértice M1, com 5 a 10 satélites, apresentou o pior desempenho geral (2,154 m), evidenciando que a combinação de baixo número de satélites e obstrução vegetal é particularmente prejudicial para a Solução monofrequência.

3.2.3 Análise da Precisão dos Métodos

3.2.3.1 Solução L1 – Alta Variabilidade e Suscetibilidade a Condições Desfavoráveis

A Solução L1 apresentou a maior variabilidade nos resultados de precisão, com desvios padrão variando de 0,003 m (M5) a 2,121 m (M1). Esse comportamento indica que a Solução L1 é fortemente influenciada pelas condições de rastreamento, especialmente pela geometria dos satélites e pela qualidade do sinal.

O vértice M1 destacou-se com a pior precisão (2,154 m), sugerindo condições desfavoráveis durante sua coleta, como possível obstrução do sinal ou baixa geometria satelital. Esse resultado é consistente com os parâmetros de qualidade do rastreio, que indicaram que M1 (na tecnologia L1) apresentou número moderado de satélites (5 a 10) e taxa de ocupação de apenas 28,3%. Em contrapartida, os vértices M3 e M5 apresentaram precisão milimétrica (0,013 m e 0,005 m, respectivamente), evidenciando que, em condições ideais, a Solução L1 pode alcançar resultados satisfatórios. No entanto, a alta sensibilidade às condições de campo torna o método menos confiável para aplicações que exigem resultados consistentes em diferentes cenários operacionais.

Os elevados desvios observados na solução L1 devem ser interpretados com cautela, pois podem decorrer não apenas da limitação da tecnologia monofrequência, mas também de erro sistemático de processamento, incompatibilidade de datum, projeção, transformação de coordenadas ou escolha inadequada da referência de comparação.

3.2.3.2 Solução L1/L2 – Alta Precisão e Consistência

A Solução L1/L2 apresentou precisão horizontal com a maioria dos vértices alcançando valores milimétricos (mediana de 0,005 m). Esses resultados confirmam a superioridade da dupla frequência na mitigação de erros sistemáticos, especialmente os efeitos da ionosfera, que é um dos principais fatores de degradação da precisão em

levantamentos GNSS, mas não está imune a flutuação de vértice no pós-processamento e exigindo o retorno a área para um novo rastreio do ponto.

A solução L1/L2 apresentou elevada coerência interna em relação à base local validada por PPP. Contudo, essa coerência não deve ser interpretada como exatidão absoluta nula, uma vez que a avaliação independente exigiria comparação com pontos de controle externos ou reocupações independentes.

Neste caso, o vértice M1 (0,498 m), que apresentou a pior precisão entre os marcos, confirmando que as condições de coleta nesse ponto foram menos favoráveis. No entanto, é importante notar que, mesmo no pior cenário, a precisão da L1/L2 (0,498 m) foi significativamente superior à da L1 no mesmo vértice (2,154 m), evidenciando a robustez do método de dupla frequência.

3.2.3.3 Solução RTX – Alta Precisão e Homogeneidade

A solução RTX apresentou melhor precisão interna e menor amplitude entre os valores (0,018 m a 0,036 m para os vértices do perímetro), demonstrando alta consistência e homogeneidade nos resultados de repetibilidade. Contudo, essa avaliação deve ser distinguida da análise de erro horizontal em relação a uma referência externa.

3.2.4 Correlação entre o Erro Horizontal dos Vértices e o Aumento da Área e do Perímetro

3.2.4 Associação entre o erro horizontal dos vértices e as alterações de área e perímetro

A análise integrada dos resultados de área e perímetro, em confronto com os dados da matrícula, sugere associação entre deslocamentos horizontais dos vértices e alterações nas grandezas geométricas da poligonal. Como não foi apresentado coeficiente estatístico de correlação, recomenda-se utilizar o termo associação observada, evitando afirmar correlação direta sem demonstração quantitativa.

No caso da área de estudo controlada, os resultados obtidos pelas soluções GNSS utilizadas nesta pesquisa indicam que pequenos deslocamentos dos vértices podem produzir diferenças relevantes de área e perímetro, especialmente quando a poligonal resultante se desloca sistematicamente em relação à geometria da matrícula.

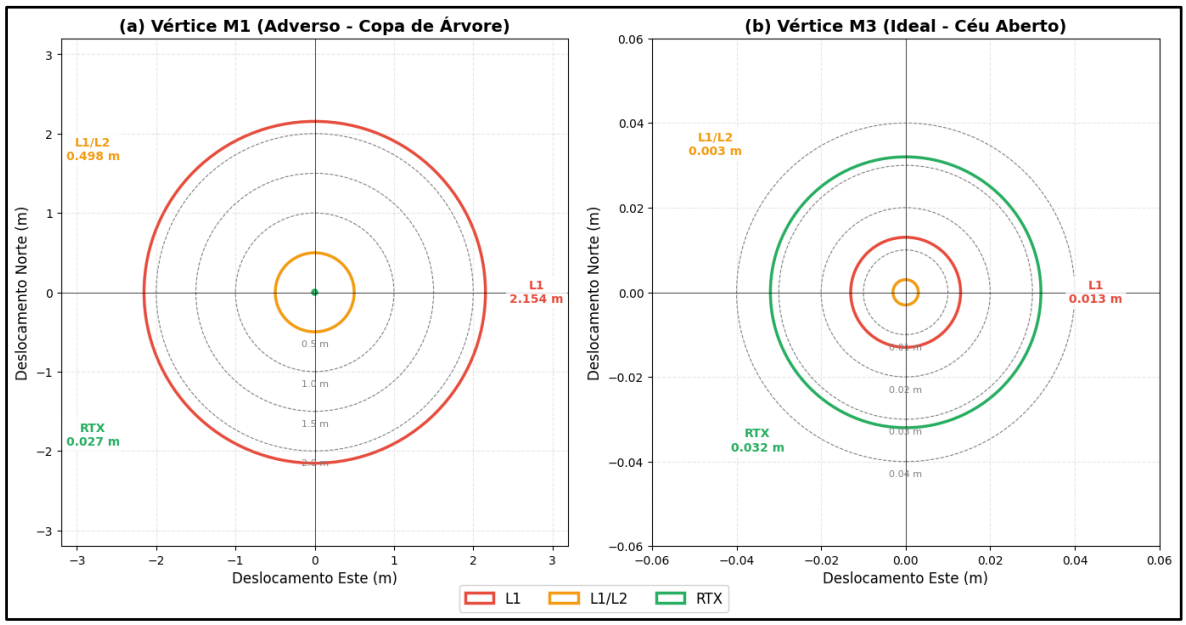
A Solução L1 pós-processada, com erro horizontal médio de 0,559 m, apresentou relação Área/Perímetro de 1,20, indicando que o pós-processamento refinou a geometria da poligonal. O perímetro foi reduzido em 9,65 m (de 1.086,44 m para 1.076,79 m) e a área aumentou em 0,0795 ha (de 5,8385 ha para 5,9180 ha). No entanto, os mesmos 60% dos

vértices (M1, M2 e M4) permaneceram com Solução Flutuante, demonstrando que o pós-processamento refina a geometria, mas não corrige a fragilidade da Solução monofrequência.

Em contrapartida a Solução L1/L2 pré-processada, com erro horizontal médio de 0,105 m, apresentou relação Área/Perímetro de 1,05, indicando consistência geométrica moderada. A pequena variação entre o pré e o pós-processamento (+0,0020 ha; -3,49 m) evidencia que os dados brutos da dupla frequência já apresentavam alta consistência. No entanto, o vértice M1 apresentou Solução Flutuante (20% dos vértices), evidenciando que a cobertura vegetal compromete a qualidade do sinal mesmo com receptor de dupla frequência.

As adversidades de campo podem ser observadas na comparação entre os vértices M1, em condição adversa sob copa de árvores, e M3, em condição de céu aberto, evidenciando o impacto da cobertura vegetal sobre a qualidade do sinal GNSS (Figura 13).

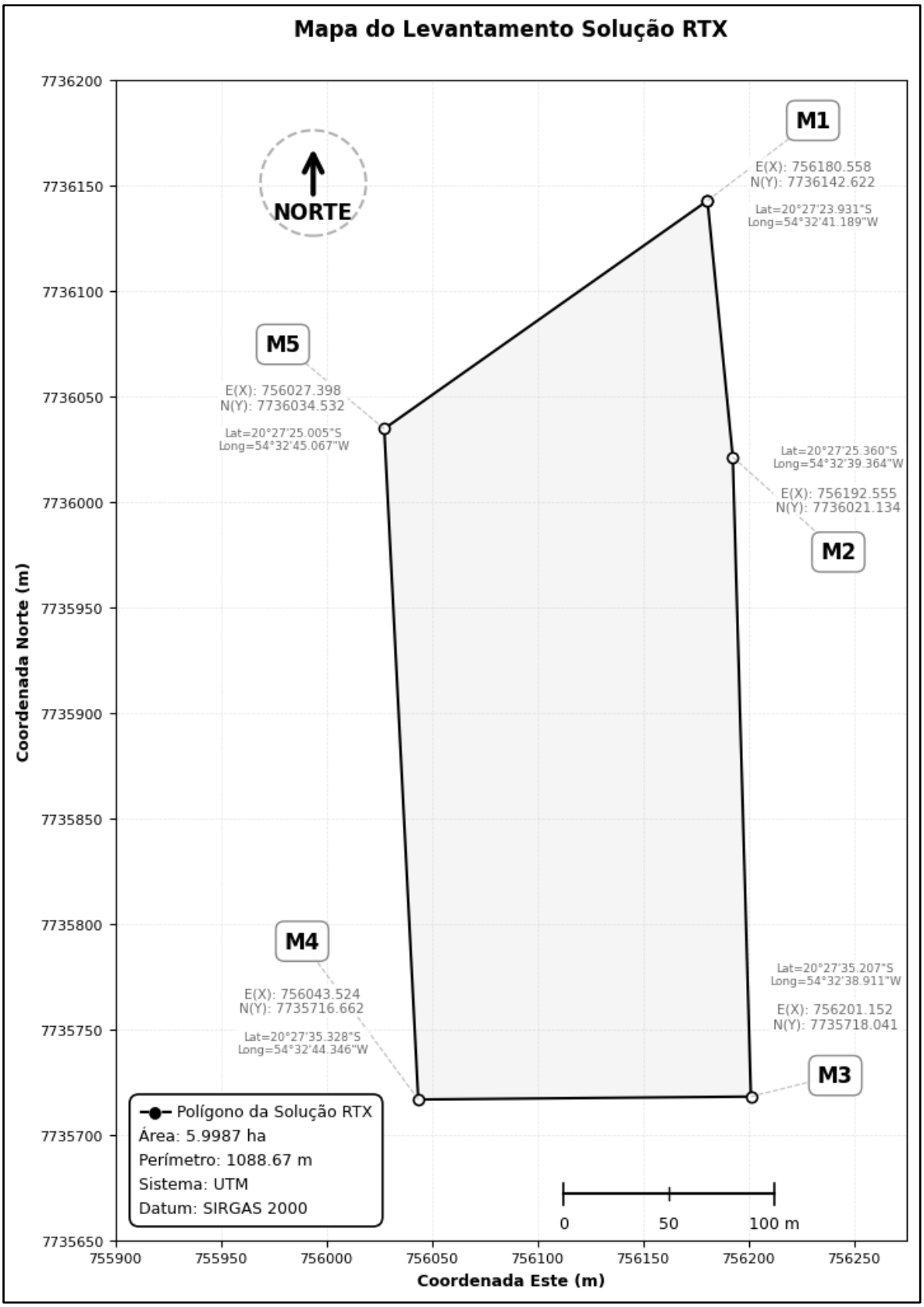
Figura 12: Representação circular do erro horizontal dos vértices M1 e M3 por Solução



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A solução RTX, com precisão horizontal média de 0,030 m, apresentou poligonal mais externa em relação à matrícula. Essa diferença deve ser interpretada como divergência entre a geometria documental e a geometria levantada em campo, não como prova isolada de erro da matrícula (Figura 14).

Figura 13: Mapa da Solução RTX da Área de Estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

3.2.5 A Sobreposição dos Mapas e as Implicações para a Atualização Cadastral

A sobreposição dos mapas da matrícula (Figura 3, p. 22) e da solução RTX (Figura 13, p. 58) evidencia visualmente as diferenças geométricas entre a geometria documental do imóvel e a geometria levantada em campo (Figura 14).

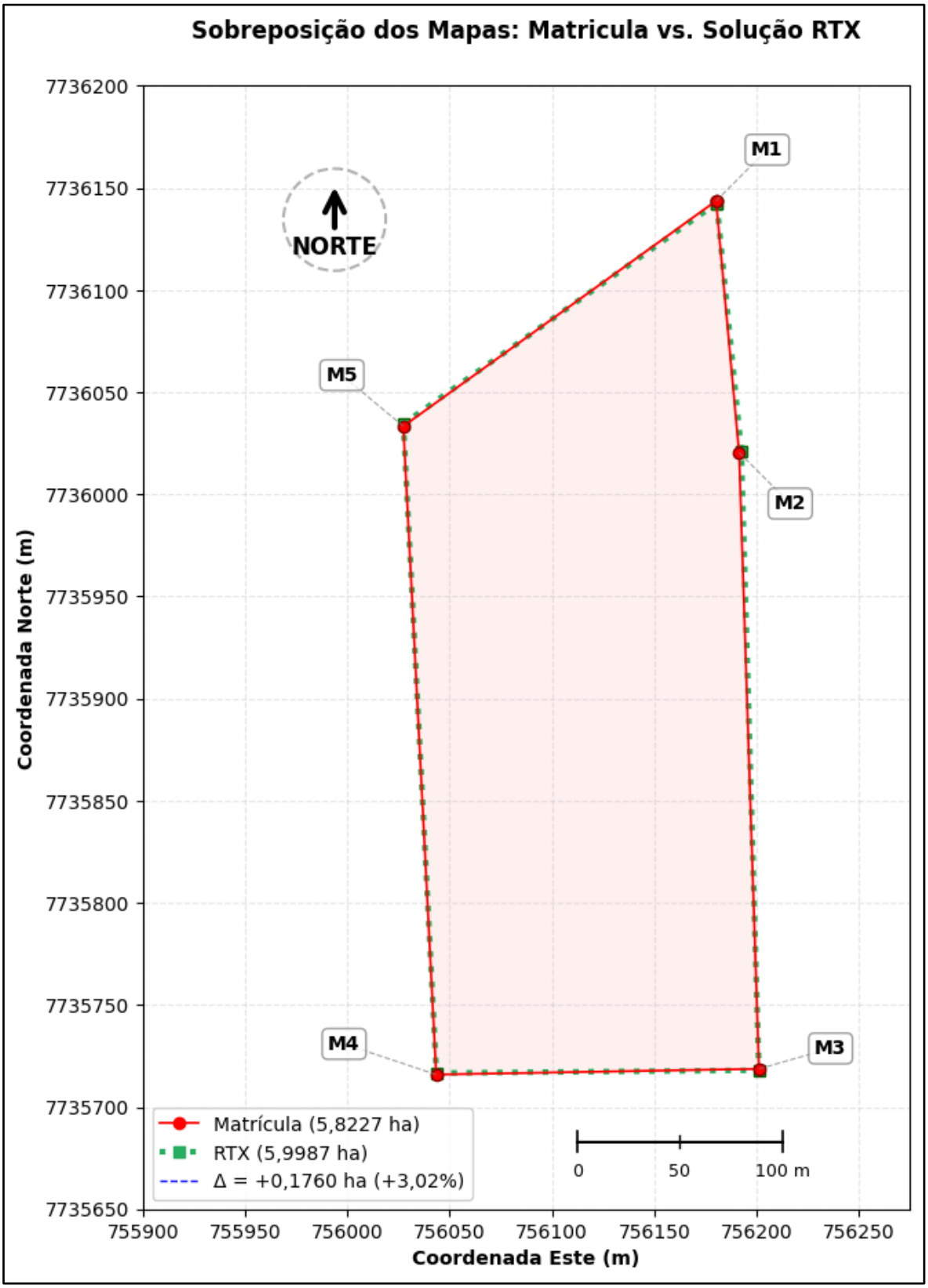
Os resultados indicam que os deslocamentos horizontais dos vértices podem influenciar as diferenças de área e perímetro entre as soluções GNSS e a matrícula. Entretanto, a interpretação deve considerar que a matrícula é uma referência documental, e não necessariamente uma referência geodésica independente de alta precisão

A poligonal da solução RTX apresenta-se sistematicamente mais externa que a poligonal da matrícula, com deslocamentos mais pronunciados em alguns vértices. Essa divergência deve ser interpretada como diferença entre a geometria documental da matrícula e a geometria obtida em campo, não como prova isolada de erro da matrícula.

Esse deslocamento sistemático está relacionado às diferenças posicionais entre os vértices levantados e os vértices representados na matrícula, podendo contribuir para o aumento da área e do perímetro observados nas soluções GNSS.

A sobreposição dos mapas evidenciou diferença entre a geometria documental da matrícula e a geometria levantada pela solução RTX, com aumento de área de 0,1760 ha (+3,02%) e de perímetro de 26,43 m (+2,49%). Essa diferença reforça a importância da atualização cadastral e da validação técnica dos limites em campo.

Figura 14: Sobreposição dos Mapas: Matrícula vs. Solução RTX



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa avaliou três metodologias GNSS: pós-processamento com frequência L1, pós-processamento com dupla frequência L1/L2 e serviço de correção em tempo real RTX, em área de estudo controlada composta por cinco vértices. A análise comparou precisão, eficiência operacional e aderência geométrica em relação à matrícula.

A análise integrada dos resultados mostrou que a cobertura vegetal é o fator de maior impacto sobre a qualidade do sinal GNSS, independentemente da tecnologia empregada.

O vértice M1 demonstrou que condições locais de rastreio podem comprometer o desempenho de qualquer tecnologia GNSS, inclusive soluções em tempo real como o RTX. Assim, pontos sob vegetação ou obstrução devem ter uma maior atenção para a validação dos dados em campo.

Outro resultado relevante foi a associação observada entre os deslocamentos dos vértices e as alterações nos valores de área e perímetro. Essa relação indica que pequenos deslocamentos planimétricos podem gerar diferenças significativas nas grandezas geométricas da poligonal, essas diferenças são justificáveis pela maior precisão do método GNSS em relação à Matrícula original.

Nas condições avaliadas neste estudo de caso, a solução RTX mostrou-se mais adequada para levantamentos georreferenciados que exigem alta produtividade em campo e precisão horizontal compatível com aplicações de georreferenciamento. Entretanto, sua adoção deve estar condicionada à verificação da qualidade da solução em cada ponto levantado, especialmente em ambientes com obstrução vegetal.

Os resultados indicam potencial de aplicação das tecnologias avaliadas em levantamentos voltados ao georreferenciamento de imóveis rurais, mas a conformidade normativa deve ser verificada caso a caso, conforme os critérios técnicos do INCRA/SIGEF e a qualidade posicional obtida em cada vértice.

Já a solução L1/L2 pós-processada mostrou-se uma alternativa tecnicamente robusta e de alta precisão, capaz de alcançar resultados milimétricos em condições favoráveis, porém exige maior tempo de campo, base local e etapa posterior de processamento em escritório.

A solução L1 pós-processada apresentou maior sensibilidade a obstruções e à geometria satelital, não sendo recomendada para levantamentos que exijam alta confiabilidade sem validação rigorosa das soluções obtidas.

Por fim, recomenda-se, para trabalhos futuros, a ampliação da amostra para diferentes tipologias de cobertura do solo e condições climáticas, bem como a avaliação de outros serviços de correção em tempo real disponíveis no mercado, a fim de consolidar um panorama mais abrangente sobre o desempenho das tecnologias GNSS aplicadas ao georreferenciamento de imóveis rurais no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. 1988. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidente da República, [1988]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: em: 19 mai. 2026.

BRASIL. 2001. **Lei nº 10.267, de 28 de agosto de 2001.** Altera os arts. 176 e 226 da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 29 ago. 2001. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10267.htm. Acesso em: 19 abr. 2026.

BRASIL. 2002. **Decreto nº 4.449, de 30 de outubro de 2002.** Regulamenta a Lei nº 10.267, de 28 de agosto de 2001. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 31 out. 2002. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4449.htm. Acesso em: 19 abr. 2026.

BRASIL. 2005. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Instrução Normativa nº 20, de 17 de março de 2005**. Brasília, DF: INCRA, 2005. Disponível em: https://www.gov.br/incra/pt-br/centrais-de-conteudos/legislacao/in_20_2005.pdf. Acesso em: 10 mai. 2026.

BRASIL. 2006. **Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006**. Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. Brasília, DF: Presidência da República, 2006. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11326.htm. Acesso em: 9 mai. 2026.

BRASIL. 2009a. **Lei nº 11.952, de 25 de junho de 2009.** Dispõe sobre a regularização fundiária das ocupações incidentes em terras situadas em áreas da União, no âmbito da Amazônia Legal. Diário Oficial da União: Brasília, DF, jun. 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l11952.htm. Acesso em: 20 abr. 2026.

BRASIL. 2009b. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Instrução Normativa nº 57, de 20 de outubro de 2009**. Regulamenta o procedimento para identificação, reconhecimento, delimitação, demarcação, desintrusão, titulação e registro das terras ocupadas por remanescentes das comunidades dos quilombos. Brasília, DF: INCRA, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/incra/pt-br/centrais-de-conteudos/legislacao/in_57_2009.pdf. Acesso em: 9 mai. 2026.

BRASIL. 2013. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). **Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais**. 3. ed. Brasília: INCRA, 2013. Disponível em: https://sigef.incra.gov.br/static/documentos/norma_tecnica_georreferenciamento_imoveis_rurais_3ed.pdf . Acesso em: 10 mai. 2026.

BRASIL. 2018. **Decreto nº 9.311, de 15 de março de 2018**. Altera o Decreto nº 4.449, de 30 de outubro de 2002, que regulamenta a Lei nº 10.267, de 28 de agosto de 2001, e o Decreto nº 5.996, de 20 de dezembro de 2006. Brasília, DF: Presidência da República, 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/d9311.htm. Acesso em: 10 mai. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.285, de 29 de dezembro de 2021**. Altera as Leis nº 12.651, de 25 de maio de 2012, e nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 30 dez. 2021. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2021/lei-14285-29-dezembro-2021-792179-publicacaooriginal-164251-pl.html. Acesso em: 10 mai. 2026

BRASIL. 2025. **Decreto nº 12.689, de 21 de outubro de 2025**. Altera o Decreto nº 4.449, de 30 de outubro de 2002, para regulamentar o disposto no art. 176, § 4º, da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973. Brasília, DF: Presidência da República, 2025. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/decreto/d12689.htm. Acesso em: 9 mai. 2026.

CARBALLIDO, J.; 2014. PÉREZ RUIZ, M.; EMMI, L.; AGÜERA VEGA, J. **Comparison of positional accuracy between RTK and RTX GNSS based on the autonomous agricultural vehicles under field conditions**. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 30, n. 3, p. 361-368, 2014.

COSTA, R. C. 2018. **Acurácia do Posicionamento GNSS de Dupla Frequência em Modos Estático e Cinemático.** 2018. 150 pg. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

DRUMMOND, C. D. 2015. **Georreferenciamento de Imóveis Rurais: métodos e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Editora Baratina, 2015.

FREITAS, A. P. 2017. **Avaliação Histórica dos Receptores GNSS de Dupla Frequência e a Mitigação Ionosférica.** Revista Brasileira de Agrimensura, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 45-60, jul./dez. 2017.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. 1997. **Global Positioning System: theory and practice.** 4. ed. Wien: Springer-Verlag, 1997.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. 2008. **GPS: Theory and Practice.** 5th ed. New York: Springer-Verlag, 2008. 450 p.

IBGE. 2023. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS.** Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf. Acesso em: 25 set. 2025.

INCRA. 2022. **Manual Técnico para Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 2. ed. Brasília: INCRA, 2022.

IBGE. 2023. **Serviço online para pós-processamento de dados GNSS — IBGE-PPP**. Rio de Janeiro: IBGE.

KRUEGER, C. P. 2011. **GNSS**: fundamentos e aplicações. Curitiba: UFPR, 2011.

MARTINS, B. R. 2023. **Comparação de Desempenho entre o Posicionamento Estático Convencional e o PPP-RTK em Ambientes Rurais.** 2023. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre RS, 2023.

MONICO, J. F. G. 2008. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008.

MONTEIRO, C. S.; OLIVEIRA, J. A. 2019. **A Importância da Geotecnologia de Alta Precisão na Engenharia Civil. Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 36, n. 1, p. 110-125, jan./abr. 2019.

NADAL, C. A. 2017. **Georreferenciamento de imóveis rurais: aspectos tecnológicos, legais e administrativos.** [S.l.]: [s.n.], 2017.

RIBEIRO, M. N. 2021. **Impacto da Demanda por Velocidade na Acurácia do Posicionamento em Projetos de Infraestrutura.** 2021. 180 f. Tese (Doutorado em Geodésia) – – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba- PR, 2021.

SEEBER, G. 2003. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications.** 2nd ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SILVA, J. K. 2022. **Geotecnologias Aplicadas: Tendências e Desafios da Geodésia Moderna. Editora Técnica**, v. 15, n. 3, p. 20-35, set. 2022.

TEIXEIRA, N. N.; SANTOS, A. L. O.; CRUZ JÚNIOR, D. C.; SILVA NETO, M. P. **Gestão Fundiária Rural: avaliação da acurácia da técnica de posicionamento GNSS PPP-RTK para fins de certificação de imóveis rurais junto ao INCRA**. *Revista de Gestão e Secretariado*, v. 16, n. 7, 2025.

TRIMBLE. 2026. **Serviço de correção RTX**. Trimble Field Systems Help Portal, 2026. Disponível em: https://help.fieldsystems.trimble.com/trimble-access/latest/pt/gnss-survey-rtx.htm. Acesso em: 9 abr. 2026.