



RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 20/08/2028.

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**



IGOR HENRIQUE SIRIANI

**ALGORITMOS PARA REDUÇÃO DA INCERTEZA
NA ANÁLISE DE DADOS GEORREFERENCIADOS**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
RIO CLARO**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

IGOR HENRIQUE SIRIANI

**ALGORITMOS PARA REDUÇÃO DA INCERTEZA NA ANÁLISE DE DADOS
GEORREFERENCIADOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Profº Dr. Fabricio Aparecido Breve

Rio Claro - SP

2026

S619a	<p data-bbox="470 1395 710 1433">Siriani, Igor Henrique</p> <p data-bbox="470 1433 1125 1556">Algoritmos para redução da incerteza na análise de dados georreferenciados / Igor Henrique Siriani. -- Rio Claro, 2026 124 p. : il., tabs., fotos</p> <p data-bbox="470 1590 1220 1713">Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Fabricio Aparecido Breve</p> <p data-bbox="470 1747 1220 1870">1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Agricultura de precisão. 3. Algoritmos. 4. Aprendizado do computador. 5. Morfologia matemática. I. Título.</p>
-------	--

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa permite medir a área efetivamente trabalhada em operações agrícolas manuais usando apenas as posições registradas por um celular comum, com erro médio de 4,9%. Assim, produtores e prestadores de serviço podem acompanhar produtividade e uso de insumos sem receptores de alto custo, em linha com os ODS 2 e 12.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research makes it possible to measure the area actually worked in manual farming operations using only the positions logged by an ordinary smartphone, with a mean error of 4.9%. Farmers and service providers can thus track productivity and input use without high-cost receivers, in line with SDGs 2 and 12.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

IGOR HENRIQUE SIRIANI

**ALGORITMOS PARA REDUÇÃO DA INCERTEZA NA ANÁLISE DE DADOS
GEORREFERENCIADOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fabricio Aparecido Breve
IGCE / UNESP / Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Guilherme Palermo Coelho
UNICAMP / Campinas (SP)

Prof. Dr. Eraldo Pereira Marinho
IGCE / UNESP / Rio Claro (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 20 de agosto de 2026.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Jacto Máquinas Agrícolas S.A., que forneceu equipamentos essenciais para a realização dos experimentos e obtenção dos dados necessários.

À Entrevias Concessionária de Rodovias S.A., pelo auxílio na coleta de dados, viabilizando a aplicação prática e validação dos métodos propostos.

Aos colegas e orientadores, pelo suporte técnico e pelas contribuições valiosas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

À minha família e amigos, pelo incentivo e apoio contínuo durante esta jornada acadêmica.

“As universidades serão o que são suas bibliotecas”
(Gelfand)

RESUMO

Este estudo propõe um método de pós-processamento para estimativa da área efetivamente trabalhada em operações de campo de baixa velocidade, a partir de registros de posição produzidos por receptores GNSS de baixo custo. As abordagens existentes de aprendizado de máquina para mitigação de erros em GNSS operam predominantemente no nível do sinal, utilizando características como relação portadora-ruído e resíduos de pseudodistância, que não constam dos registros produzidos pelos equipamentos e aplicativos empregados nessas operações. O método proposto, denominado KNN-Misto, atribui a cada ponto um peso de confiabilidade calculado por K-Nearest Neighbors sobre sua vizinhança espaço-temporal, com transformação sigmoide, e aplica um fechamento morfológico à união dos discos ponderados para supressão de componentes residuais. O algoritmo opera exclusivamente sobre as coordenadas geográficas e o registro de tempo de cada ponto, sem exigir metadados do sinal, e é compatível com qualquer receptor que produza um registro de posições. Os hiperparâmetros são calibrados por Otimização por Enxame de Partículas (PSO) diretamente contra o erro percentual de área, separadamente por modalidade de operação, uma vez que o raio efetivo de aplicação e o padrão de deslocamento diferem entre roçagem, pulverização com costal e aplicação de doses com costal. A avaliação é conduzida sobre 73 conjuntos de operações agrícolas de pulverização e de dosagem em cana-de-açúcar, açaí, arroz, tabaco, banana, café, eucalipto e reflorestamento, com áreas de referência entre $7,2 \times 10^2$ e $4,3 \times 10^4$ m², e o método é comparado com a solução Padrão sem ponderação, o fechamento morfológico isolado, o KNN padrão, o KNN ponderado pela distância euclidiana e o KNN ponderado por sigmoide, todos calibrados pelo mesmo procedimento e no mesmo espaço de busca. O KNN-Misto obteve erro percentual absoluto médio de 4,90%, erro mediano de 4,23% e erro percentual médio com sinal de +0,48%, contra 8,08% do fechamento isolado e 15,59% da solução Padrão, com diferença significativa em relação a cada um dos cinco métodos pelo teste de Wilcoxon pareado após correção de Holm. A estimativa ficou dentro de 10% da área de referência em 93,2% dos conjuntos e dentro de 20% em 98,6%. A decomposição do ganho sobre a linha de base atribui a maior parte dele ao fechamento morfológico, e a ponderação por confiabilidade atua como componente de apoio na redução da cauda de erro.

Palavras-Chave: GNSS; Agricultura de precisão; Área trabalhada; KNN; Fechamento morfológico.

ABSTRACT

This study proposes a post-processing method for estimating the effectively worked area in low-speed field operations from position logs produced by low-cost GNSS receivers. Existing machine learning approaches for GNSS error mitigation operate predominantly at the signal level, using features such as carrier-to-noise density ratio and pseudorange residuals, which are absent from the logs produced by the equipment and applications used in these operations. The proposed method, termed KNN-Misto, assigns each point a reliability weight computed by K-Nearest Neighbors over its spatio-temporal neighbourhood, with a sigmoid transformation, and applies a morphological closing to the union of weighted discs to suppress residual components. The algorithm operates exclusively on the geographic coordinates and timestamp of each point, without requiring signal metadata, and is compatible with any receiver capable of producing a position log. Hyperparameters are calibrated by Particle Swarm Optimization (PSO) directly against the percentage area error, separately for each operation type, since the effective application radius and the movement pattern differ between brushcutting, knapsack spraying and knapsack dose application. The evaluation is conducted on 73 agricultural spraying and dosing datasets spanning sugarcane, açai, rice, tobacco, banana, coffee, eucalyptus and reforestation, with reference areas ranging from 7.2×10^2 to 4.3×10^4 m², and the method is compared against the unweighted baseline, morphological closing in isolation, standard KNN, Euclidean distance-weighted KNN and sigmoid-weighted KNN, all calibrated by the same procedure and within the same search space. KNN-Misto achieved a mean absolute percentage error of 4.90%, a median error of 4.23% and a signed mean percentage error of +0.48%, against 8.08% for closing in isolation and 15.59% for the unweighted baseline, with a significant difference from each of the five methods under the paired Wilcoxon test after Holm correction. Estimates fell within 10% of the reference area in 93.2% of the datasets and within 20% in 98.6%. The decomposition of the gain over the baseline attributes most of it to the morphological closing, with the reliability weighting acting as a supporting component in reducing the error tail.

Keywords: GNSS; Precision agriculture; Worked area; KNN; Morphological closing.

Title in English: Algorithms for reducing uncertainty in the analysis of georeferenced data.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Erros de órbita	38
Figura 2	Atrasos ionosféricos e troposféricos	41
Figura 3	<i>Multipath</i>	42
Figura 4	Fluxograma do pipeline experimental. O asterisco indica a etapa aplicada somente ao Fechamento isolado e ao KNN-Misto.	90
Figura 5	Polígonos formados pelos seis algoritmos sobre um conjunto de aplicação de doses em café, com área de referência de 3.658,55 m ² , sob a calibração de dosagem	106
Figura 6	Polígonos formados por três algoritmos sobre um trecho de roçagem rodoviária cuja superfície central é de brita, sob a calibração de roçagem . . .	108
Figura 7	Polígono formado pelo KNN-Misto sobre um trecho de roçagem rodoviária junto a uma placa de sinalização, sob a calibração de roçagem. O retângulo destaca o entorno da placa, onde a faixa se alarga	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos de entrada dos filtros de estimação em cada nível de aplicação e disponibilidade no registro de posições deste trabalho.	57
Tabela 2 – Comparação estrutural entre famílias de métodos de mitigação de erro GNSS por aprendizado de máquina, segundo o dado exigido na entrada.	62
Tabela 3 – Componentes de cada PCB da plataforma de roçagem	69
Tabela 4 – Hiperparâmetros dos algoritmos de estimativa de área	75
Tabela 5 – Configuração do PSO e espaço de busca	84
Tabela 6 – Hiperparâmetros resultantes do PSO, mantidos fixos na avaliação	85
Tabela 7 – Aferição da referência por digitalização orbital contra medida em fita métrica	92
Tabela 8 – Erro relativo de área por deslocamento uniforme do contorno, sob hipótese de região quadrada	93
Tabela 9 – Distribuição dos conjuntos de avaliação por modalidade	94
Tabela 10 – Composição da base ampliada de avaliação	95
Tabela 11 – Erro de área por algoritmo nos 73 conjuntos agrícolas	98
Tabela 12 – Teste de Wilcoxon pareado e bicaudal do erro absoluto, KNN-Misto contra cada método ($n = 73$)	99
Tabela 13 – Erro percentual médio com sinal (MPE) por faixa de área de referência	100
Tabela 14 – Erro de área por algoritmo nos 29 conjuntos de pulverização	102
Tabela 15 – Erro de área por algoritmo nos 44 conjuntos de dosagem	102
Tabela 16 – Teste de Wilcoxon pareado e bicaudal do erro absoluto por modalidade, KNN-Misto contra cada método, com correção de Holm por estrato	103
Tabela 17 – Erro de área com sinal por algoritmo nos três conjuntos de roçagem de área medida em campo	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSRS-PPP	Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EKF	Extended Kalman Filter
FAA	Federal Aviation Administration
FIR	Finite Impulse Response
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPSTk	GPS Toolkit
GSA	European GNSS Agency
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
IGS	International GNSS Service
IMU	Inertial Measurement Unit
KNN	K-Nearest Neighbors
KNN-STM	K-Nearest Neighbors with Short Term Memory
NRCan	Natural Resources Canada
PIB	Produto Interno Bruto
PCB	Printed Circuit Board
PSO	Particle Swarm Optimization
RDP	Ramer-Douglas-Peucker
RTK	Real-Time Kinematic
UKF	Unscented Kalman Filter
VDOP	Vertical Dilution of Precision
WAAS	Wide Area Augmentation System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Objetivos do Trabalho	28
1.2	Contribuições	29
1.3	Estruturação do Trabalho	31
2	REFERENCIAL TEÓRICO	33
2.1	Módulos GNSS	33
2.2	Constelações de Satélites	34
2.3	Manutenção do Almanaque e Efemérides	35
2.4	Cálculo de Posição e Pseudodistância	36
2.5	Fatores que Afetam a Precisão do GNSS	37
2.5.1	Erros de Órbita e de Relógio dos Satélites	37
2.5.2	Atrasos Ionosféricos e Troposféricos	39
2.5.3	<i>Multipath</i>	41
2.5.4	Máscara de Elevação e Obstruções	43
2.5.5	Qualidade do Hardware e Projeto do Receptor	44
2.6	Condições de Baixa Velocidade ou Estacionárias	46
2.6.1	<i>Multipath</i> em Baixa Velocidade	46
2.6.2	Geometria dos Satélites e Trocas de Constelação	46
2.6.3	O Filtro de Navegação em Baixa Velocidade	47
2.7	Técnicas de Mitigação	48
2.7.1	Correções e Fontes Externas ao Receptor	48
2.7.2	Filtros de Estimação	51
2.7.3	Pós-processamento de Trajetórias	57
2.8	Aprendizado de Máquina Aplicado a GNSS	59
2.8.1	K-Nearest Neighbors	60
2.8.2	Comparação com os Métodos de Nível de Sinal	61
2.9	Fundamentos do Método Proposto	62
2.9.1	Área Trabalhada como União de Discos	63
2.9.2	Ponderação por Vizinhança no Espaço e no Tempo	64
2.9.3	Fechamento Morfológico	65
2.9.4	Calibração por Enxame de Partículas	66
2.10	Síntese	67
3	MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1	Plataforma de Coleta nas Roçadeiras	69

3.2	Integração e Configuração do Sistema	70
3.3	Coleta de Dados	70
3.4	Plataforma de Coleta nas Modalidades Agrícolas	71
3.5	Pré-processamento e Normalização dos Dados	72
3.5.1	Segmentação dos pontos de trabalho efetivo	72
3.5.2	Normalização por <i>min-max</i>	73
3.6	Projeção Cartográfica	74
3.7	Algoritmos de Avaliação de Confiabilidade	74
3.7.1	Vizinhança e distância	75
3.7.2	KNN padrão	77
3.7.3	KNN ponderado pela distância euclidiana (KNN-Distância)	77
3.7.4	KNN ponderado por sigmoide (KNN-Sigmoide)	78
3.7.5	Representação geométrica da área trabalhada	78
3.7.6	Filtro morfológico de fechamento	80
3.7.7	KNN-Sigmoide com fechamento (KNN-Misto)	81
3.7.8	Síntese do procedimento	81
3.8	Otimização de Hiperparâmetros por PSO	82
3.8.1	Função objetivo e área de referência	83
3.8.2	Configuração do otimizador	83
3.8.3	Hiperparâmetros resultantes	84
3.9	Calibração por Modalidade de Operação	85
3.9.1	Raio efetivo e alcance físico	86
3.10	Protocolo de Avaliação	87
3.10.1	Comparação estatística entre métodos	87
3.10.2	Conjuntos de calibração e de avaliação	88
3.10.3	Domínio de aplicação quanto à extensão da área	89
3.10.4	Visão geral do pipeline experimental	89
3.11	Referência de Área por Digitalização em Imagem Orbital	90
3.11.1	Requisito e critério de escolha	90
3.11.2	Protocolo de digitalização	91
3.11.3	Aferição do procedimento contra medida em fita métrica	92
3.11.4	Dependência do erro relativo com a extensão da área	92
3.11.5	Composição da base ampliada	94
4	ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS	97
4.1	Objeto e Critérios da Avaliação	97
4.2	Resultados Obtidos	97
4.2.1	Significância das Diferenças	98
4.2.2	Efeito da Forma da Função de Ponderação	100

4.2.3	Decomposição do Ganho entre Ponderação e Fechamento	101
4.2.4	Estratificação por Modalidade	102
4.2.5	Síntese das Contribuições	103
4.2.6	Desempenho na Modalidade de Roçagem	104
4.3	Validação Qualitativa	105
4.3.1	Fidelidade Geométrica do Contorno	105
4.3.2	Exclusão de Área Não Trabalhada	107
4.3.3	Variação Local da Largura Trabalhada	109
5	CONCLUSÃO	111
5.1	Relevância	111
5.2	Limitações	112
5.3	Trabalhos Futuros	114
5.4	Considerações Finais	114
5.5	Publicações no Período do Mestrado	115
	Referências	117
	DADOS CURRICULARES	124

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é determinante para o progresso sustentável e para a garantia da segurança alimentar mundial, e no Brasil está diretamente ligada à economia, à sociedade e à conservação do meio ambiente. A agricultura brasileira é reconhecida como altamente competitiva e geradora de empregos, de riqueza, de alimentos, de fibras e de bioenergia para o Brasil e para outros países (EMBRAPA, 2020). O setor responde por 21% da soma de todas as riquezas produzidas no país, um quinto de todos os empregos e 43,2% das exportações brasileiras, tendo alcançado US\$ 96,7 bilhões em 2019 (EMBRAPA, 2020).

Neste contexto, a Agricultura de Precisão se apresenta como uma técnica moderna que utiliza tecnologias avançadas para melhorar a produção alimentar. Os propósitos centrais da Agricultura de Precisão englobam a diminuição de despesas operacionais, o incremento da produtividade, a otimização do uso de pesticidas agrícolas e a proteção do solo e do ambiente, além da formação do agricultor. No Brasil, entidades pioneiras como a Embrapa, Jacto, Drakkar e Soluagro lideram a implementação e a evolução dessas tecnologias no setor (CNA, 2016).

A Agricultura de Precisão também vem sendo implementada por pequenos agricultores que fazem agricultura familiar e utilizam equipamentos portáteis, como pulverizadores costais, por exemplo. Programas e políticas governamentais, como o Pronaf (Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar), fornecem fundos, suporte técnico e formação para os agricultores familiares que desejam implementar a Agricultura de Precisão em suas propriedades (CNA, 2016).

Embora os benefícios sejam claros, a implementação da Agricultura de Precisão apresenta obstáculos consideráveis, particularmente para a agricultura familiar. Os pequenos produtores muitas vezes encontram dificuldades para se beneficiar dessas inovações devido à complexidade no transporte e manuseio de equipamentos de geolocalização de alta precisão, ao alto custo desses equipamentos e à baixa precisão dos dispositivos de baixo custo e pequeno porte. Estes últimos, embora mais acessíveis, são suscetíveis a influências ambientais que podem introduzir erros significativos no posicionamento global (DIDONET; FREITAS; MELLO et al., 2020).

O posicionamento desses dispositivos é obtido por sistemas GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite), como GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, sujeitos a várias fontes de erro: desvios orbitais e de relógio dos satélites, atrasos ionosféricos e troposféricos, efeitos de multipercurso (*multipath*), obstruções ambientais e a qualidade do próprio receptor. Esses fatores comprometem a precisão do posicionamento e qualquer análise subsequente de dados georreferenciados, como o cálculo da área efetivamente trabalhada em uma operação, reforçando a necessidade de métodos que mitiguem esses erros.

Apesar do crescente volume de trabalhos que aplicam aprendizado de máquina à mitigação de erros em sistemas GNSS, as abordagens existentes operam predominantemente no nível do sinal, utilizando características como a relação portadora-ruído (C/N_0), resíduos de pseudodistância

e ângulo de elevação dos satélites para classificar sinais como LOS (*line-of-sight*) ou NLOS (*non-line-of-sight*) e ajustar os pesos das medições (LI et al., 2023; OZEKI; KUBO, 2022), ou para prever diretamente o erro de pseudodistância (JGOUTA; NSIRI, 2017). Esses métodos exigem acesso a metadados do sinal bruto, que os equipamentos e aplicativos empregados em aplicações agrícolas e de manutenção de infraestrutura em geral não registram. O que chega ao usuário, inclusive quando a posição é obtida pelo smartphone do operador, é a sequência de posições registradas.

Este trabalho propõe uma formulação distinta da avaliação de confiabilidade em dados GNSS. Em vez de inferir a qualidade de uma medição a partir de características do sinal, avalia-se a confiabilidade de cada ponto exclusivamente a partir de onde ele está e de quando foi coletado, em relação à sua vizinhança espaço-temporal. O método opera em pós-processamento sobre a sequência de posições, a tripla (latitude, longitude, *timestamp*), sem exigir qualquer metadado de sinal, sendo, portanto, compatível com qualquer receptor que produza um registro de posições, independentemente do hardware. Dessa forma, a avaliação de confiabilidade é transferida do nível do sinal, dependente do receptor, para o nível da trajetória pós-processada, agnóstico ao hardware.

Cabe delimitar o que o método faz com essa avaliação. O resultado é um peso de confiabilidade entre zero e um para cada ponto, e esse peso modula a contribuição do ponto na estimativa da área trabalhada. As coordenadas registradas permanecem inalteradas; o método não corrige a posição de nenhum ponto. Assim, o ganho de precisão recai sobre a grandeza derivada da trajetória, a área efetivamente trabalhada, da qual se obtêm produtividade e consumo de insumos. A correção ponto a ponto da trajetória a partir desses pesos é discutida como continuidade no Capítulo 5.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é estimar a área efetivamente trabalhada em operações realizadas com equipamentos portáteis, a partir de registros de posição produzidos por receptores GNSS de baixo custo, atribuindo a cada ponto georreferenciado um peso de confiabilidade calculado exclusivamente a partir da tripla (latitude, longitude, *timestamp*), sem metadados de sinal.

Desse objetivo geral decorrem os seguintes objetivos específicos:

1. implementar, sobre um mesmo pipeline geométrico de estimativa de área, seis variantes de ponderação: a solução Padrão, sem ponderação, que constitui a linha de base; o fechamento morfológico isolado; o K-Nearest Neighbors (KNN); o KNN ponderado pela distância euclidiana (KNN-Distância); o KNN ponderado por sigmoide (KNN-Sigmoide); e a composição da ponderação sigmoide com o fechamento morfológico, denominada KNN-Misto;

2. calibrar os hiperparâmetros das seis variantes por Particle Swarm Optimization (PSO), sob um mesmo espaço de busca, minimizando diretamente o erro percentual de área sobre uma fração sorteada dos conjuntos de cada modalidade de operação, com calibração separada por modalidade;
3. avaliar as seis variantes sobre 73 conjuntos de operações agrícolas de pulverização e de dosagem em oito culturas, contra referência de área independente da trajetória GNSS, por meio de erro percentual absoluto médio, erro médio com sinal, dispersão, teste de significância pareado, análise de concordância e estratificação por modalidade;
4. validar qualitativamente os contornos estimados em conjuntos selecionados, para distinguir aderência ao contorno real de cancelamento entre inclusão indevida e omissão de área.

A coleta de dados teve origem na manutenção rodoviária, com roçadeiras equipadas com placas de circuito impresso (PCBs) contendo módulos GNSS e sensores de rotação, e foi posteriormente estendida a equipamentos costais de pulverização e de aplicação de doses operados em lavoura, nos quais a posição é registrada pelo smartphone do operador e o acionamento do implemento é reportado pelo equipamento via Bluetooth. Os três conjuntos de roçagem com área medida em campo servem à validação da calibração dessa modalidade e são reportados separadamente, sob três perfis ambientais distintos; a avaliação quantitativa do método é conduzida sobre a base agrícola.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

Da formulação no nível da trajetória derivam seis contribuições específicas e verificáveis. A composição KNN-Misto, contribuição (4), é a que os resultados sustentam de forma mais direta; o indicador de confiabilidade e a função de ponderação, contribuições (1) e (2), são sustentados como componentes de apoio dessa composição, conforme a Subseção 4.2.5.

1. **Um indicador de confiabilidade puramente geométrico-temporal:** a confiabilidade de cada ponto é estimada por uma ponderação KNN sobre a densidade de sua vizinhança no espaço normalizado (lat, lon, *timestamp*), dispensando integralmente os metadados de sinal exigidos pelas abordagens existentes. A Seção 4.2 avalia esse indicador sob raio calibrado pelo mesmo procedimento para todos os métodos: a ponderação sigmoide isolada reduz o erro percentual absoluto médio da solução Padrão de 15,59% para 13,48%. O indicador cumpre o requisito de operar exclusivamente sobre a tripla de posição e tempo, e seu efeito sobre o erro de área é modesto quando aplicado sozinho.
2. **Uma função de ponderação sigmoide parametrizável:** diferentemente da ponderação por distância euclidiana, cuja forma funcional é fixa, a transformação sigmoide introduz um grau de liberdade (o parâmetro de escala κ) ajustado por modalidade de operação, que satura os pesos nos dois extremos e separa de modo mais nítido a vizinhança confiável

da ruidosa. A Seção 4.2 quantifica esse efeito: a ponderação linear pela distância perde invariância de escala e eleva o erro percentual absoluto médio a 45,75%, acima do KNN sem ponderação (14,54%) e da solução Padrão (15,59%), ao passo que o KNN-Sigmoide o reduz a 13,48%. O grau de liberdade κ evita essa degradação e atenua, sem eliminar, a dependência do erro com a escala da área.

3. **O uso do PSO como otimizador de hiperparâmetros guiado pela métrica-fim:** o PSO não estima posição; ele ajusta os hiperparâmetros (número de vizinhos n , escala κ , raio do disco r , conversão temporal v e raios do fechamento morfológico) minimizando *diretamente* o erro percentual de área, a grandeza de interesse prático. Os seis métodos foram calibrados sob o mesmo procedimento e o mesmo espaço de busca, com o raio do disco incluído na busca para todos eles, de modo que a ordenação reportada na Tabela 11 resulta de calibração simétrica. O KNN-Misto apresentou erro médio com sinal de +0,48% sobre a base avaliada.
4. **A composição KNN-Misto:** a aplicação sequencial da ponderação sigmoide e do fechamento morfológico combina a atenuação de pontos isolados, obtida pela primeira, com a supressão dos componentes residuais que sobrevivem a ela, obtida pelo segundo. A composição alcança o menor erro percentual absoluto médio (4,90%), a menor mediana (4,23%), o menor percentil 95 (10,67%) e a menor dispersão entre os seis métodos avaliados, com vantagem significativa sobre cada etapa isolada após correção por multiplicidade. A Seção 4.2 decompõe o ganho sobre a linha de base e atribui a maior parte dele ao fechamento morfológico; a ponderação sigmoide contribui para a redução da cauda de erro.
5. **A calibração de hiperparâmetros por modalidade de operação:** o raio efetivo de aplicação e o padrão de deslocamento diferem entre roçagem, pulverização com costal e aplicação de doses com costal, e um único vetor de hiperparâmetros não descreve as três modalidades. A Seção 3.9 reporta os vetores por modalidade e a Subseção 4.2.4 mostra que a dosagem é a modalidade de maior erro para os seis métodos e que o viés do KNN-Misto muda de sinal entre pulverização e dosagem.
6. **A avaliação em contexto agrícola diversificado:** a validação é conduzida sobre 73 conjuntos de operações de pulverização e de dosagem em cana-de-açúcar, açaí, arroz, tabaco, banana, café, eucalipto e reflorestamento, com áreas de referência entre 722,40 m² e 42.903,47 m² e com geometrias de contorno irregular e vazios internos.

A relevância dessas contribuições reside na acessibilidade. Ao prescindir de metadados de sinal, o método estende a avaliação de confiabilidade de dados GNSS, até aqui condicionada ao registro de observáveis brutos, a qualquer coleta que produza um registro de posições. Isso viabiliza a contabilização de área trabalhada, e consequentemente de produtividade, a partir do hardware já presente na operação, em contextos como a agricultura familiar e a

manutenção rodoviária, nos quais soluções de alto custo são inviáveis. Os dados avaliados provêm de operações comerciais; a transferência ao contexto da agricultura familiar decorre da compatibilidade de hardware, e sua validação direta é indicada como continuidade.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

1. Introdução: apresenta o contexto e a importância do estudo, o problema da confiabilidade de dados GNSS em receptores de baixo custo, os objetivos e as contribuições do trabalho.
2. Referencial Teórico: apresenta o funcionamento do GNSS, as fontes de erro e a sua manifestação em baixa velocidade, e organiza as técnicas de mitigação pelo dado que exigem na entrada: correções externas ao receptor, filtros no nível do sinal e sobre posições, pós-processamento de trajetórias e aprendizado de máquina. Apresenta os fundamentos das técnicas que compõem o método: a área como união de discos, a ponderação por vizinhança no espaço e no tempo, o fechamento morfológico e a calibração por PSO, e encerra com a síntese da lacuna que o trabalho ocupa.
3. Materiais e Métodos: descreve a plataforma de coleta de dados, incluindo as PCBs, os sensores, os módulos GNSS e a extensão aos equipamentos costais. Detalha o método proposto: a segmentação do trabalho efetivo, o cálculo do peso de confiabilidade por KNN e sua transformação sigmoide, o fechamento morfológico, a estimativa de área por união de discos ponderados, a calibração dos hiperparâmetros por PSO e a construção da referência de área.
4. Análise Experimental e Resultados: apresenta os resultados dos seis métodos sobre a base agrícola, com erro percentual absoluto médio, erro com sinal, dispersão, teste de Wilcoxon pareado e análise de concordância, seguidos da validação qualitativa dos contornos e da análise por perfil ambiental nos conjuntos de roçagem.
5. Conclusões e Trabalhos Futuros: resume os principais achados, declara as limitações do estudo e propõe direções para continuação da pesquisa.

5 CONCLUSÃO

O ponto de partida desta investigação foi a constatação de que os métodos de aprendizado de máquina para mitigação de erros em GNSS dependem predominantemente de metadados de sinal, como relação portadora-ruído, resíduos de pseudodistância e ângulo de elevação, e de que esses metadados não constam dos registros produzidos pelos equipamentos e aplicativos empregados na coleta. O que chega ao usuário, inclusive quando a posição é obtida pelo smartphone do operador, é a sequência de posições. Para operar sob essa restrição, propôs-se o KNN-Misto, um método de pós-processamento que estima a área trabalhada a partir da tripla (latitude, longitude, *timestamp*): cada ponto recebe um peso de confiabilidade calculado sobre sua vizinhança espaço-temporal, por ponderação KNN com transformação sigmoide, e a união dos discos ponderados é submetida a um fechamento morfológico que suprime os componentes residuais. Os hiperparâmetros são calibrados por PSO contra o erro percentual de área, separadamente por modalidade de operação.

As seções a seguir discutem a relevância dos resultados obtidos, reconhecem as limitações do desenho experimental, propõem direções de continuidade para a pesquisa e encerram com as considerações finais e a produção associada ao período do mestrado.

5.1 RELEVÂNCIA

A relevância deste trabalho decorre, em primeiro lugar, da reformulação proposta para o problema de avaliação de confiabilidade em dados GNSS. Em vez de inferir a qualidade de uma medição a partir de características do sinal, como fazem as abordagens de nível de sinal revisadas no Capítulo 2 (LYU; GAO, 2020; HUANG; DAI; ZHU, 2026), o método avalia cada ponto exclusivamente a partir de onde e quando ele foi coletado. Essa mudança para o nível da trajetória pós-processada torna a avaliação de confiabilidade independente do receptor, e qualquer registro de posições passa a ser entrada admissível para o método.

A avaliação sobre 73 conjuntos agrícolas, com os seis métodos calibrados pelo mesmo procedimento, no mesmo espaço de busca e separadamente por modalidade, sustenta as seis contribuições enunciadas na Seção 1.2 em graus distintos, conforme a Subseção 4.2.5. A composição KNN-Misto, contribuição (4), é a sustentada de forma mais direta: o método obteve o menor erro percentual absoluto médio (4,90%), a menor mediana (4,23%), o menor percentil 95 (10,67%) e a maior proporção de conjuntos dentro das faixas de 10% e de 20% (93,2% e 98,6%), com viés de +0,48%. A decomposição da Subseção 4.2.3 atribui a maior parte do ganho sobre a solução Padrão ao fechamento morfológico, que isolado reduz o erro médio de 15,59% para 8,08%, e situa a ponderação sigmoide como componente de apoio, com redução para 13,48% quando aplicada isolada. Dessa forma, o indicador geométrico-temporal, contribuição (1), e a função sigmoide parametrizável, contribuição (2), são sustentados como condições de funcionamento da composição: o indicador cumpre o requisito de operar sem metadado de sinal,

e o grau de liberdade κ evita a degradação produzida pela ponderação linear pela distância, que eleva o erro a 45,75%, além de atenuar, sem eliminar, a dependência do erro com a escala da área. O PSO guiado pela métrica-fim, contribuição (3), é sustentado pela própria comparação, uma vez que a ordenação reportada resulta de calibração simétrica entre os métodos, com o raio do disco incluído na busca para todos eles. A calibração por modalidade, contribuição (5), é sustentada pela estratificação da Subseção 4.2.4: a dosagem é a modalidade de maior erro para os seis métodos, e o viés do KNN-Misto muda de sinal entre pulverização e dosagem. A avaliação em contexto agrícola diversificado, contribuição (6), cobre operações em cana-de-açúcar, açaí, arroz, tabaco, banana, café, eucalipto e reflorestamento, com áreas de referência entre 722,40 m² e 42.903,47 m² e com contornos irregulares e vazios internos.

O concorrente mais próximo do método proposto é o Fechamento isolado, com erro médio de 8,08%. A diferença entre os dois, de 3,18 pontos percentuais no erro médio e de 2,34 pontos percentuais na redução mediana pareada, é significativa após correção por multiplicidade, com tamanho de efeito de 0,33 (Subseção 4.2.1). A vantagem concentra-se na dispersão, com intervalo interquartil de 4,61 pontos percentuais no KNN-Misto contra 8,51 no Fechamento, e é estabelecida na dosagem ($p = 0,011$). Na pulverização, a diferença entre os dois não alcança significância sob o tamanho de amostra disponível ($p = 0,18$). A contribuição do método em relação ao fechamento isolado está, portanto, na redução da cauda de erro e na estabilidade entre modalidades.

No plano prático, a relevância do método está em dispensar qualquer dado além do registro de posições. Isso viabiliza a contabilização de área trabalhada, e consequentemente de produtividade, a partir do hardware já presente na operação, em contextos nos quais soluções de posicionamento de maior custo são inviáveis. Os dados avaliados provêm de operações comerciais, e a transferência ao contexto da agricultura familiar decorre da compatibilidade de hardware, cuja validação direta é indicada como continuidade.

5.2 LIMITAÇÕES

O desenho experimental adotado impõe um conjunto de limitações que devem ser consideradas na interpretação do alcance deste trabalho.

- **Referência de área obtida por digitalização orbital.** A área de referência dos 73 conjuntos agrícolas foi obtida por digitalização sobre imagem de satélite, e não por medição direta em campo. O erro de 1,24% da aferição (Subseção 3.11.4) foi observado nos três conjuntos de roçagem de área medida com fita métrica, e a incerteza da referência na base agrícola não foi medida diretamente nem propagada ao contraste pareado entre algoritmos. A base permanece adequada a medir o desempenho sob variação de cultura, geometria e receptor, porém, não discrimina diferenças de acurácia abaixo de aproximadamente 1%.

- **Amplitude da incerteza por conjunto individual.** Os limites de concordância de Bland-Altman, entre $-11,16\%$ e $+13,19\%$, situam a incerteza da estimativa de um conjunto isolado em torno de 12% da área estimada. O método é adequado à contabilização agregada de área operada e à apuração por talhão sob tolerância dessa ordem, e não à apuração sob tolerância mais estreita.
- **Raio calibrado sem decomposição física.** Os raios obtidos pelo PSO nas modalidades agrícolas superam o alcance físico de aplicação medido em campo, absorvendo de forma agregada o vazio longitudinal entre pontos consecutivos e o espaçamento entre passadas (Subseção 3.9.1). Nenhuma das duas grandezas foi medida, e o raio permanece um parâmetro efetivo sem correspondência direta com a geometria do implemento.
- **Hiperparâmetros junto aos limites do espaço de busca.** No KNN-Distância, o raio efetivo na pulverização ($14,859$ m, contra o teto de $15,0$ m) e o número de vizinhos na dosagem (99 , contra o teto de 100) situam-se a menos de 2% do limite superior, de modo que o ótimo dessa variante pode estar fora do intervalo admitido. Além disso, o fator de conversão temporal v resultou acima de 85% do teto de $0,005$ m/s em seis dos doze vetores que o utilizam (Tabela 6). O espaço de busca foi mantido único para os seis métodos, e o efeito de sua ampliação sobre o erro e sobre a ordenação dos métodos não foi avaliado.
- **Inclusão de superfície adjacente em trechos lineares.** Na roçagem rodoviária, quando a dispersão lateral do receptor é da mesma ordem que a largura trabalhada, o polígono avança sobre a faixa de rolamento adjacente (Subseção 4.3.3). O método discrimina pela densidade e pela largura da faixa de registros, e não pela natureza da superfície, e a área indevidamente incluída não foi quantificada.
- **Geometria regular dos conjuntos de calibração da roçagem.** Os conjuntos de calibração da modalidade de roçagem foram deliberadamente restritos a trechos de rodovia longos, retos e planos (Seção 3.10), e os três conjuntos de área medida em campo correspondem a áreas de geometria retangular e uniforme. Essa restrição não se aplica à base agrícola, que inclui contornos irregulares e vazios internos.
- **Condições de baixa velocidade.** Consistente com o escopo definido no título e na introdução deste trabalho, o método foi avaliado exclusivamente em condições de baixa velocidade ou estacionárias. Seu comportamento em operações de maior velocidade, nas quais a dinâmica do *multipath* e a eficácia dos filtros de suavização diferem (Seção 2.6), não foi investigado.

Essas limitações delimitam o escopo em que os achados foram estabelecidos e orientam as direções de continuidade discutidas na seção seguinte.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

A partir das limitações identificadas e dos objetivos originalmente propostos para a pesquisa, delineiam-se as seguintes direções de continuidade:

- **Correção de trajetórias.** Desenvolver e validar um modelo que utilize os pesos de confiabilidade produzidos pelo KNN-Misto na correção ponto a ponto da trajetória GNSS registrada, aproximando o caminho reconstruído do percurso real do equipamento. O método atual preserva as coordenadas registradas.
- **Ampliação da base de roçagem.** Coletar conjuntos adicionais de roçagem com área medida em campo, em geometrias distintas da retangular, de modo a permitir avaliação fora da amostra de ajuste e inferência estatística nessa modalidade.
- **Quantificação da inclusão de superfície adjacente.** Digitalizar a faixa de rolamento sobre imagem orbital nos trechos de roçagem rodoviária e medir a área do polígono estimado que a intersecta, de modo a quantificar a inclusão indevida descrita na Subseção 4.3.3.
- **Extensão a outras análises georreferenciadas.** Investigar a aplicabilidade da avaliação de confiabilidade espaço-temporal a outras tarefas de análise geoespacial no contexto agrícola, como detecção de sobreposição entre passadas, detecção de falhas de aplicação e mapeamento de produtividade.
- **Extensão a condições de maior velocidade.** Avaliar o comportamento do KNN-Misto em operações conduzidas a velocidades mais altas que as do regime estacionário ou de baixa velocidade estudado, verificando se a vizinhança espaço-temporal permanece um indicador eficaz de confiabilidade quando a dinâmica do *multipath* se altera.
- **Comparação empírica com métodos de nível de sinal.** Em coletas nas quais o aplicativo registre também os observáveis brutos expostos pela plataforma do smartphone, conduzir uma comparação empírica direta com esquemas de ponderação por SVM (LYU; GAO, 2020) e modelos híbridos PSO-KELM (HUANG; DAI; ZHU, 2026), complementando a comparação estrutural da Tabela 2 com evidência quantitativa sobre uma mesma base.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho partiu de uma limitação estrutural das abordagens de aprendizado de máquina para mitigação de erros em GNSS: sua dependência de metadados de sinal ausentes dos registros produzidos pelos equipamentos e aplicativos em uso na operação agrícola e na manutenção de infraestrutura. Ao deslocar a avaliação de confiabilidade do nível do sinal para o nível da trajetória pós-processada, o KNN-Misto obteve estimativas de área trabalhada com erro

percentual absoluto médio de 4,90% e erro mediano de 4,23% sobre 73 conjuntos de operações agrícolas de pulverização e de dosagem, distribuídos por oito culturas, com áreas de referência entre 722,40 m² e 42.903,47 m² e dados coletados pelos smartphones dos próprios operadores. O resultado é o melhor entre os seis métodos comparados sob calibração simétrica, com estimativa dentro de 20% da referência em 98,6% dos conjuntos e viés de +0,48%. A maior parte do ganho sobre a linha de base decorre do fechamento morfológico, e a ponderação por confiabilidade atua como componente de apoio na redução da cauda de erro. As limitações reconhecidas neste capítulo demarcam o trabalho que resta para consolidar o método: a avaliação em base disjunta da calibração, a validação direta do indicador de confiabilidade e a verificação da independência de hardware com registro controlado do receptor.

5.5 PUBLICAÇÕES NO PERÍODO DO MESTRADO

Durante o período do mestrado, a pesquisa apresentada nesta dissertação gerou as seguintes produções:

- SIRIANI, Igor Henrique. *O uso de algoritmos de otimização inspirados pela natureza na escolha de parâmetros de redes neurais artificiais*. XII Workshop do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UNESP, 2023. (Apresentação em seminário).
- SIRIANI, Igor Henrique. *Algoritmos para Redução da Incerteza na Análise de Dados Georreferenciados*. XIII Workshop do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UNESP, 2024. (Apresentação em seminário).
- SIRIANI, Igor Henrique; BREVE, Fabricio Aparecido. Reducing uncertainty in the analysis of low-cost GNSS georeferenced data: a hardware-agnostic post-processing method. *Expert Systems With Applications*, 2026. (Submetido).

REFERÊNCIAS

- ASHKENAZI, V. et al. A New High Precision Wide Area DGPS System. **Journal of Navigation**, 1997.
- BIRANT, Derya; KUT, Alp. ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial–temporal data. **Data & Knowledge Engineering**, v. 60, n. 1, p. 208–221, 2007. DOI: 10.1016/j.datak.2006.01.013.
- BREUNIG, Markus M. et al. LOF: identifying density-based local outliers. In: PROCEEDINGS of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Dallas, TX: [s.n.], 2000. P. 93–104. DOI: 10.1145/335191.335388.
- CNA. **PROGRAMA Agricultura de Precisão**. 2016. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/projetos-e-programas/agricultura-de-precis%C3%A3o>>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- DIDONET, Agostinho Dirceu; FREITAS, Alexandre Aires de; MELLO, Alexandre Furtado Silveira et al. Desafios de inovação para a agricultura familiar. In: BITTENCOURT, D. M. de C. (Ed.). **Estratégias para a agricultura familiar: visão de futuro rumo à inovação**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. (Texto para Discussão, 49). P. 257–289.
- DILLON, Andrew; RAO, Lakshman Nagraj. **Land Measurement Bias: Comparisons from Global Positioning System, Self-Reports, and Satellite Data**. [S.l.], 2018. DOI: 10.22617/WPS189279-2.
- DOUCET, Arnaud; FREITAS, Nando de; GORDON, Neil (Ed.). **Sequential Monte Carlo Methods in Practice**. New York: Springer, 2001. DOI: 10.1007/978-1-4757-3437-9.
- DOUGLAS, David H.; PEUCKER, Thomas K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. **Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization**, 1973.
- EMBRAPA. **A agricultura brasileira**. 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/vii-plano-diretor/a-agricultura-brasileira>>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- ESA. **Galileo begins serving the globe**. 2016. Disponível em: <https://www.esa.int/Applications/Satellite_navigation/Galileo_begins_serving_the_globe>. Acesso em: 6 fev. 2025.
- EUROPEAN GNSS AGENCY. **Using GNSS Raw Measurements on Android Devices**. Prague, 2017. White paper.
- EUSPA. **Have you met HAS?** European Union Agency for the Space Programme. 2024. Disponível em: <<https://www.euspa.europa.eu/newsroom-events/news/have-you-met-has>>. Acesso em: 18 out. 2026.

EUSPA. **What is SBAS?** European Union Agency for the Space Programme. 2024. Disponível em: <<https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas>>. Acesso em: 18 out. 2026.

FIX, Evelyn; HODGES JR., Joseph L. **Discriminatory analysis: nonparametric discrimination: consistency properties**. Randolph Field, TX, 1951.

GAO, Ning et al. A robust tracking loop using adaptive H_{∞} unscented Kalman filter in GNSS receivers. In: 2024 14th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). [S.l.: s.n.], 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/IPIN62893.2024.10786182.

GENG, Jianghui et al. An Improved Hatch Filter Algorithm towards Sub-Meter Positioning Using only Android Raw GNSS Measurements without External Augmentation Corrections. **Remote Sensing**, v. 11, n. 14, p. 1679, 2019. DOI: 10.3390/rs11141679.

GOOGLE. **FusedLocationProviderClient**. Google Play services for Android. Disponível em: <<https://developers.google.com/android/reference/com/google/android/gms/location/FusedLocationProviderClient>>. Acesso em: 1 out. 2026.

_____. **Location: getAccuracy()**. Android Developers. Disponível em: <[https://developer.android.com/reference/android/location/Location#getAccuracy\(\)](https://developer.android.com/reference/android/location/Location#getAccuracy())>. Acesso em: 1 out. 2026.

GORDON, Neil J.; SALMOND, David J.; SMITH, Adrian F. M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. **IEE Proceedings F: Radar and Signal Processing**, v. 140, n. 2, p. 107–113, 1993. DOI: 10.1049/ip-f-2.1993.0015.

GRÄLER, Benedikt; PEBESMA, Edzer; HEUVELINK, Gerard. Spatio-Temporal Interpolation using gstat. **The R Journal**, v. 8, n. 1, p. 204–218, 2016. DOI: 10.32614/RJ-2016-014.

GREWAL, Mohinder S.; ANDREWS, Angus P. **Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB**. [S.l.]: John Wiley Sons, Inc, 2001.

GROVES, Paul D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems**. [S.l.]: Artech House, 2013.

HAN, Chunhao; YANG, Yuanxi; CAI, Zhiwu. BeiDou Navigation Satellite System and its time scales. **Metrologia**, v. 48, n. 4, s213–s218, 2011. DOI: 10.1088/0026-1394/48/4/S13.

HATCH, Ron. The synergism of GPS code and carrier measurements. In: PROCEEDINGS of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning. Las Cruces, NM: [s.n.], 1982. v. 2, p. 1213–1231.

HAUTAMÄKI, Ville; KÄRKKÄINEN, Ismo; FRÄNTI, Pasi. Outlier detection using k-nearest neighbour graph. In: PROCEEDINGS of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2004). [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 430–433. DOI: 10.1109/ICPR.2004.1334558.

- HERSHBERGER, John; SNOEYINK, Jack. **Speeding up the Douglas-Peucker line-simplification algorithm**. Vancouver, 1992.
- HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard; LICHTENEGGER, Herbert; COLLINS, James. **GPS - Theory and Practice**. [S.l.]: Springer-Verlag Wien, 2001.
- HOLM, Sture. A simple sequentially rejective multiple test procedure. **Scandinavian Journal of Statistics**, v. 6, n. 2, p. 65–70, 1979.
- HOPFIELD, Helen S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. **Journal of Geophysical Research**, v. 74, n. 18, p. 4487–4499, 1969. DOI: 10.1029/JC074i018p04487.
- HUANG, Xu; DAI, Zhongliang; ZHU, Xinlong. Pseudorange error prediction and correction using PSO-KELM for smartphone GNSS urban positioning. **GPS Solutions**, 2026.
- JGOUTA, Meriem; NSIRI, Benayad. GNSS Positioning Performance Analysis Using PSO-RBF Estimation Model. **Transport and Telecommunication Journal**, 2017.
- JULIER, Simon J.; UHLMANN, Jeffrey K. Unscented filtering and nonlinear estimation. **Proceedings of the IEEE**, v. 92, n. 3, p. 401–422, 2004. DOI: 10.1109/JPROC.2003.823141.
- KALMAN, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. **Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering**, 1960.
- KAPLAN, Elliott; HEGARTY, Christopher. **Understanding GPS: Principles and Applications**. [S.l.]: Artech House Publishers, 2006.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: PROCEEDINGS of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks. Perth: [s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- KINTNER, Paul M.; LEDVINA, Brent M.; PAULA, Eurico R. de. GPS and ionospheric scintillations. **Space Weather**, v. 5, n. 9, 2007. DOI: 10.1029/2006SW000260.
- KLOBUCHAR, John A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, AES-23, n. 3, p. 325–331, 1987. DOI: 10.1109/TAES.1987.310829.
- LANGLEY, Richard B. Dilution of Precision. **GPS WORLD Magazine**, 1999.
- LEICK, Alfred; RAPOPORT, Lev; TATARNIKOV, Dmitry. **GPS Satellite Surveying**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2015.
- LI, Lintong et al. Machine learning based GNSS signal classification and weighting scheme design in the built environment: a comparative experiment. **Satellite Navigation**, v. 4, p. 12, 2023. DOI: 10.1186/s43020-023-00101-w.
- LYU, Zhitao; GAO, Yang. An SVM Based Weight Scheme for Improving Kinematic GNSS Positioning Accuracy with Low-Cost GNSS Receiver in Urban Environments. **Sensors**, 2020.

- MARQUES, Haroldo Antonio; MENDONÇA, Marco Aurelio Moraes de; MONICO, João Francisco Galera. Interpolação das Órbitas Precisas dos Satélites GNSS: Análise Comparativa entre Diferentes Métodos. In: COLÓQUIO Brasileiro de Ciências Geodésicas. [S.l.: s.n.], 2009.
- MATHERON, Georges. **Éléments pour une théorie des milieux poreux**. [S.l.]: Masson et Cie, 1967.
- MAZHER, Khurram; TAHIR, Muhammad; ALI, Khurram. GNSS pseudorange smoothing: linear vs non-linear filtering paradigm. In: 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/AERO.2016.7500779.
- MISRA, Pratap; ENGE, Per. **Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance**. [S.l.]: Ganga-Jamuna Press, 2010.
- MONTENBRUCK, Oliver; GILL, Eberhard. **Satellite Orbits: Models, Methods and Applications**. Berlin: Springer, 2000. DOI: 10.1007/978-3-642-58351-3.
- OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2010.
- OZEKI, Tomohiro; KUBO, Nobuaki. GNSS NLOS signal classification based on machine learning and pseudorange residual check. **Frontiers in Robotics and AI**, v. 9, p. 868608, 2022. DOI: 10.3389/frobt.2022.868608.
- PAREDES-HERNÁNDEZ, Cutberto Uriel et al. Horizontal positional accuracy of Google Earth's imagery over rural areas: a study case in Tamaulipas, Mexico. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 4, p. 588–601, 2013. DOI: 10.1590/S1982-21702013000400005.
- PAZIEWSKI, Jacek. Recent advances and perspectives for positioning and applications with smartphone GNSS observations. **Measurement Science and Technology**, v. 31, n. 9, p. 091001, 2020. DOI: 10.1088/1361-6501/ab8a7d.
- PEDREGOSA, Fabian et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, v. 12, p. 2825–2830, 2011.
- POTERE, David. Horizontal Positional Accuracy of Google Earth's High-Resolution Imagery Archive. **Sensors**, v. 8, n. 12, p. 7973–7981, 2008. DOI: 10.3390/s8127973.
- PRESS, William H.; TEUKOLSKY, Saul A.; VETTERLING, William T. **Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007.
- PSIAKI, Mark L.; JUNG, Hee. Extended Kalman filter methods for tracking weak GPS signals. In: PROCEEDINGS of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002). Portland, OR: [s.n.], 2002. P. 2539–2553.
- PULIGHE, Giuseppe; BAIOCCHI, Valerio; LUPIA, Flavio. Horizontal accuracy assessment of very high resolution Google Earth images in the city of Rome, Italy. **International Journal of Digital Earth**, v. 9, n. 4, p. 342–362, 2016. DOI: 10.1080/17538947.2015.1031716.

- QIN, Honglei; XUE, Xia; YANG, Qian. GNSS multipath estimation and mitigation based on particle filter. **IET Radar, Sonar & Navigation**, v. 13, n. 9, p. 1588–1596, 2019. DOI: 10.1049/iet-rsn.2018.5587.
- EL-RABBANY, Ahmed. **Introduction to GPS: The Global Positioning System**. Boston: Artech House, 2002.
- RAMASWAMY, Sridhar; RASTOGI, Rajeev; SHIM, Kyuseok. Efficient algorithms for mining outliers from large data sets. In: PROCEEDINGS of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Dallas, TX: [s.n.], 2000. P. 427–438. DOI: 10.1145/335191.335437.
- RAMER, Urs. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. **Computer Graphics and Image Processing**, 1972.
- RAO, Vyasaraj Guru. NavIC User Segment: Potential, Possibilities and Challenges. In: 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC). New Delhi: [s.n.], 2019.
- SAASTAMOINEN, Juhani. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In: THE Use of Artificial Satellites for Geodesy. Washington, DC: American Geophysical Union, 1972. v. 15. (Geophysical Monograph Series). P. 247–251.
- SAVITZKY, Abraham; GOLAY, M. J. E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. **Analytical Chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627–1639, 1964. DOI: 10.1021/ac60214a047.
- SEEBER, Günter. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. [S.l.]: Walter de Gruyter, 2003.
- SERRA, Jean. **Image Analysis and Mathematical Morphology**. [S.l.]: Academic Pr, 1982.
- SHI, Yuhui; EBERHART, Russell. A modified particle swarm optimizer. In: PROCEEDINGS of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, AK: [s.n.], 1998. P. 69–73. DOI: 10.1109/ICEC.1998.699146.
- SIGRIST, P.; COPPIN, P.; HERMY, M. Impact of forest canopy on quality and accuracy of GPS measurements. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 18, p. 3595–3610, 1999.
- SIMON, Dan. **Optimal State Estimation: Kalman, H_{∞} , and Nonlinear Approaches**. Hoboken, NJ: Wiley, 2006.
- SNYDER, John P. **Map Projections: A Working Manual**. Washington, DC, 1987. DOI: 10.3133/pp1395.
- TAKASU, Tomoji; YASUDA, Akio. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. In: INTERNATIONAL Symposium on GPS/GNSS. Jeju, Korea: [s.n.], 2009.
- TEUNISSEN, Peter J. G.; MONTENBRUCK, Oliver (Ed.). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Cham: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1.

- TOLLKÜHN, Andreas et al. Stochastic GNSS multipath estimation using a particle filter. In: PROCEEDINGS of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. Monterey, CA: [s.n.], 2016. P. 858–864. DOI: 10.33012/2016.13461.
- TOLMAN, Brian W. et al. The GPS Toolkit: Open Source GPS Software. In: PROCEEDINGS of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004). Long Beach, CA: [s.n.], 2004.
- U-BLOX AG. **u-blox 8 / u-blox M8 Receiver description including protocol specification**. Thalwil, 2016. Documento UBX-13003221.
- VIRTANEN, Pauli et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, n. 3, p. 261–272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- WALEED, Muhammad et al. Determining the precise work area of agriculture machinery using Internet of Things and artificial intelligence. **Applied Sciences**, v. 10, n. 10, p. 3365, 2020. DOI: 10.3390/app10103365.
- WELCH, Greg; BISHOP, Gary. **An Introduction to the Kalman Filter**. Chapel Hill, NC, 1995.
- WIENER, Norbert. **Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series**. [S.l.]: The MIT Press, 1949.
- WILCOXON, Frank. Individual comparisons by ranking methods. **Biometrics Bulletin**, v. 1, n. 6, p. 80–83, 1945. DOI: 10.2307/3001968.
- WING, Michael G.; EKLUND, Aaron; KELLOGG, Loren D. Consumer-grade global positioning system (GPS) accuracy and reliability. **Journal of Forestry**, v. 103, n. 4, p. 169–173, 2005.
- YANG, Yuanxi; GAO, Weiguang et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system. **Navigation**, v. 66, n. 1, p. 7–18, 2019. DOI: 10.1002/navi.291.
- YANG, Yuanxi; MAO, Yue; SUN, Bijiao. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system. **Satellite Navigation**, v. 1, n. 1, 2020. DOI: 10.1186/s43020-019-0006-0.
- ZANGENEHNEJAD, Farzaneh; GAO, Yang. GNSS smartphones positioning: advances, challenges, opportunities, and future perspectives. **Satellite Navigation**, v. 2, n. 24, 2021. DOI: 10.1186/s43020-021-00054-y.
- ZHAO, Wengxiang; KHANAFSEH, Samer; PERVAN, Boris. Adaptive multiple-model Kalman filter for GNSS carrier phase and frequency estimation through wideband interference. **NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation**, v. 71, n. 2, navi.646, 2024. DOI: 10.33012/navi.646.
- ZUMBERGE, J. F. et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1997.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	Igor Henrique Siriani 28/10/1998
Nacionalidade	Brasileiro
Nome em citações bibliográficas	Siriani, Igor Henrique Siriani, I. H.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/8865629635122229
ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3789-340X
Outro identificador	-
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2023/2026	Mestrado em Ciência da Computação. Universidade Estadual Paulista (UNESP), IGCE, Rio Claro
2020/2021	Especialização em Desenvolvimento Full Stack. Centro Universitário Eurípedes de Marília
2020/2021	Tecnólogo em Gestão da Tecnologia da Informação. Centro Universitário Eurípedes de Marília
2017/2019	Tecnólogo em Big Data no Agronegócio Faculdade de Tecnologia Shunji Nishimura de Pompéia
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
SIRIANI, I. H.; BREVE, F. A. Reducing uncertainty in the analysis of low-cost GNSS georeferenced data: a hardware-agnostic post-processing method. Expert Systems With Applications, 2026. (Submetido)	
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES	
Bancas de trabalhos de conclusão	
-	
Orientações	
-	
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS	
XII WORKSHOP DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO DA UNESP, 2023. O uso de algoritmos de otimização inspirados pela natureza na escolha de parâmetros de redes neurais artificiais. 2023. (Seminário).	
XIII WORKSHOP DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO DA UNESP, 2024. Algoritmos para Redução da Incerteza na Análise de Dados Georreferenciados. 2024. (Seminário).	