AGRICULTURA DE PRECISÃO
Boletim Técnico 08

Sistemas Globais de Navegação por Satélite

Luiz Gustavo G. Sterle[1], Eudocio Rafael O. Silva[2], Marcelo C. Fu Wei[3], Ricardo Canal Filho[4], José Paulo Molin[5]

Setembro/2026

[1]Eng. Agrônomo, Doutorando em Eng. de Sistemas Agrícolas (USP-ESALQ); gustavosterle@usp.br
[2]Eng. Agrícola e Ambiental, Doutor em Eng. de Sistemas Agrícolas (USP-ESALQ); eudocio@usp.br
[3]Eng. Agrônomo, Doutor em Eng. de Sistemas Agrícolas (USP-ESALQ); marcelochan@alumni.usp.br
[4]Eng. Agrônomo, Doutorando em Eng. de Sistemas Agrícolas (USP-ESALQ); ricardocanal@usp.br
[5]Professor e coordenador do Laboratório de Agricultura de Precisão (USP-ESALQ); jpmolin@usp.br

A determinação da localização no espaço tem sido um desafio central para o ser humano, desde a época das explorações e navegações. O método de obtenção do posicionamento evoluiu com a observação de corpos celestes e a invenção de instrumentos como a bússola, o astrolábio e o sextante, até o desenvolvimento dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS). Esses sistemas, baseados em sinais de rádio e satélites artificiais, permitem determinar latitude, longitude e altitude com acurácia, além de fornecer tempo com exatidão de nanossegundos, oferecendo cobertura global e simplicidade de uso. Este boletim tem como objetivo abordar os principais elementos e conceitos relacionados ao GNSS e sua importância para o avanço da Agricultura de Precisão (AP).

GNSS: Definição e relação com a agricultura

Embora os termos sejam frequentemente usados como sinônimos, existe uma diferença fundamental: o GPS (Global Positioning System) é um sistema específico de navegação por satélite, desenvolvido e controlado pelos Estados Unidos. Já o GNSS é um termo abrangente que engloba todas as infraestruturas de navegação por satélite, incluindo as constelações globais, como o GPS americano, o GLONASS russo, o Galileo europeu e o BeiDou chinês, além dos sistemas regionais de navegação por satélite (RNSS), a exemplo do QZSS japonês e do NavIC indiano (Figura 1).

O advento do GNSS na AP foi decisivo para a disseminação das tecnologias de gestão da variabilidade nas lavouras. As coordenadas geoespaciais fornecidas por esses sistemas impulsionaram a criação de mapas, o funcionamento de controladores automáticos em máquinas de taxa variável (VRT) e a operação de sistemas de orientação, tornando-se uma tecnologia essencial para o tratamento da variabilidade espacial nas áreas agrícolas, além de permitir automações como a direção automática de tratores e outros veículos.



Figura 1. Diferença entre GNSS e GPS.

Estrutura do GNSS e Segmentos

A estrutura dos GNSS é composta por três segmentos: Espacial, de Controle e de Usuário (Figura 2). O Segmento Espacial é formado por constelações de satélites que orbitam a cerca de 20.000 km de altitude em órbitas médias, distribuídos em seis a oito planos orbitais, garantindo a visibilidade de pelo menos seis satélites de qualquer ponto da Terra. Esses satélites transmitem sinais codificados utilizados para calcular distâncias e determinar posições.

O Segmento de Controle é composto por estações terrestres que monitoram, corrigem e mantêm a operação dos satélites, controlando sua posição orbital e o funcionamento de seus sistemas.

Já o Segmento de Usuário abrange todos os receptores, civis e militares, responsáveis por captar os sinais GNSS. Cada receptor GNSS processa os sinais transmitidos, recebidos dos satélites, para determinar a posição, velocidade e tempo do receptor em qualquer lugar do mundo.

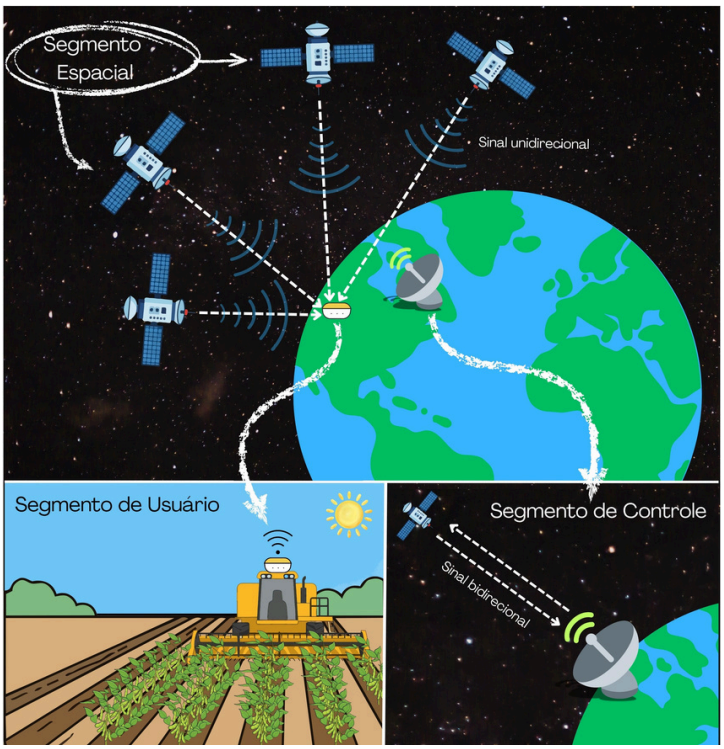


Figura 2. GNSS consiste em três segmentos: Espacial, Controle e Usuário.

GNSS: Constelações e nomenclaturas

A infraestrutura de navegação por satélite é sustentada por quatro sistemas globais principais, desenvolvidos por diferentes países e blocos geopolíticos: GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rússia), Galileo (União Europeia) e BeiDou (China), conforme apresentado na Tabela 1. Os receptores modernos utilizam sinais de múltiplas constelações simultaneamente, aumentando o número de satélites disponíveis e melhorando a qualidade do posicionamento.

Tabela 1. Visão geral das principais constelações GNSS.

Sistema	NAVSTAR GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
País/Bloco	Estados Unidos	Rússia	União Europeia	China
Órgão responsável	Força Espacial dos EUA	Roscosmos/ Ministério da Defesa	EUSPA	China Satellite Navigation
Início operacional	1995	1995 (restauração completa em 2011)	2016 (serviços inicias)/ 2024 (capacidade plena)	2020 (BeiDou-3 global)
Nº aproximado de satélites	~31	~24	~33	~35
Tipo de controle	Militar (com serviço civil aberto)	Militar (com serviço civil aberto)	Civil	Civil com supervisão estatal

Como é obtido o posicionamento?

O GNSS determina a posição com base na medição de distâncias e na trilateração, utilizando satélites como pontos de referência no espaço. Cada satélite transmite uma mensagem de navegação com informações do almanaque (dados orbitais da constelação), efemérides (posição precisa de cada satélite) e estado do sistema. São necessários quatro satélites para calcular a posição exata do receptor: três para determinar latitude, longitude e altitude, e o quarto para corrigir o erro do relógio do receptor. Para exemplificar, na constelação GPS existem em torno de 30 satélites, cada um é equipado com transmissores e receptores para enviar e receber ondas de rádio. Os satélites giram a 20.200 km da Terra com um período de 12 h. As ondas de rádio viajam na velocidade da luz, a aproximadamente 300.000 km s^{-1} no vácuo. O receptor mede o tempo gasto para que a onda chegue até ele, conforme exposto na equação 1.

$$d = c\,t \qquad \text{Eq. 1}$$

onde:
d = distância do satélite ao receptor
c = velocidade da luz
t = tempo de viagem do sinal.

Os satélites GPS transmitem múltiplas ondas portadoras, sendo as principais L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz) e L5 (1176,45 MHz), derivadas de uma frequência fundamental de 10,23 MHz gerada pelos relógios atômicos embarcados nos satélites. Esses sinais possuem baixa potência de transmissão, aproximadamente 50 W, propagam-se praticamente em linha reta e requerem, preferencialmente, visada direta entre o satélite e o receptor. Obstáculos como árvores, edificações e estruturas metálicas podem provocar bloqueio ou reflexão dos sinais (multipercurso), aumentando os erros de posicionamento, como veremos adiante com mais detalhes.

Os receptores GPS, por exemplo, podem operar com frequência simples, utilizando apenas a portadora L1, frequência dupla, utilizando L1 e L2, ou multifrequência, rastreando simultaneamente L1, L2, L5 e frequências equivalentes de outras constelações GNSS, como GLONASS, Galileo e BeiDou. O uso de múltiplas frequências permite estimar e corrigir com maior eficiência os atrasos causados pela ionosfera, reduzindo erros de posicionamento e aumentando a rapidez e a confiabilidade das soluções RTK (Real Time Kinematic) e PPP (Posicionamento por Ponto Preciso).

A portadora L1 é modulada pelos códigos Coarse/Acquisition (C/A) e Precise (P), enquanto a L2 e a L5 transportam sinais adicionais destinados a aplicações de maior acurácia. Além disso, cada satélite transmite uma mensagem de navegação em baixa frequência (50 Hz), contendo informações orbitais, correções de relógio e dados sobre o estado operacional do sistema.

Os receptores GNSS podem ser classificados conforme sua capacidade de rastrear e processar sinais dos satélites. Em geral, essa classificação está relacionada ao número de frequências observadas, ao tipo de sinal utilizado e às técnicas de correção aplicadas, fatores que determinam o nível de acurácia do posicionamento. Os receptores também podem ser classificados pelo tipo de aplicação, como navegação, geodésia, sistemas de informação geográfica (SIG) ou aquisição de tempo.

No contexto agrícola e em aplicações práticas a classificação costuma considerar principalmente o nível de acurácia e o custo do equipamento; alguns exemplos são expostos na Figura 3. Os receptores mais simples, neste boletim chamaremos de grupo I, rastreiam apenas uma frequência de navegação (frequência simples, equivalente ao L1 Coarse/Acquisition (C/A) no GPS) e utilizam medições de pseudodistância baseadas no código para uso civil transmitido pelos satélites.

Esses equipamentos apresentam acurácia métrica, normalmente entre 1 e 5 m, sendo indicados para navegação e aplicações que não exigem alta acurácia. Esses receptores costumam ser portáteis, alimentados por bateria, com tela de visualização e memória interna, além de apresentarem baixo custo de aquisição.

Alguns receptores permitem a aplicação de correções diferenciais (DGNSS), que reduzem os erros de posicionamento por meio de dados provenientes de uma estação de referência ou de serviços de correção (detalhados mais adiante). Esses equipamentos, pertencentes ao grupo II, são frequentemente utilizados em sistemas de orientação agrícola, como barras de luz instaladas em tratores, pulverizadores e aeronaves agrícolas.

Quando submetidos à correção diferencial, podem atingir acurácia entre aproximadamente 0,1 e 0,5 m. São normalmente instalados diretamente nas máquinas, não possuindo necessariamente tela ou memória própria. Receptores do grupo III, rastreiam duas ou mais frequências e constelações simultaneamente.

Essa capacidade permite estimar e corrigir erros ionosféricos e utilizar medições baseadas na fase da portadora, como RTK e PPP e são utilizados em aplicações que exigem maior acurácia, como direção automática de máquinas agrícolas, topografia e georreferenciamento. Quando operam com correção RTK, podem alcançar acurácia centimétrica, da ordem de 1 a 3 cm. Normalmente requerem a utilização de um segundo receptor de referência (rover) ou serviço de correção.

Os receptores mais modernos são capazes de rastrear sinais de múltiplas constelações GNSS, como GPS e GLONASS, entre outras. Essa característica aumenta o número de satélites disponíveis, reduz a diluição da precisão (DOP) e melhora a confiabilidade do posicionamento, especialmente em ambientes com obstáculos. Atualmente, essa tecnologia também está presente em dispositivos móveis, como smartphones, permitindo maior robustez no posicionamento.



Figura 3. Principais tipos de receptores GNSS, com exemplos de equipamentos, acurácia média e investimento.

No posicionamento por GNSS a determinação das coordenadas está sujeita a diferentes fontes de erro que influenciam diretamente a precisão e a acurácia das medições. Os erros podem ser grosseiros, como falhas de instalação da antena ou obstruções não observadas; sistemáticos, como imprecisões orbitais, erros de relógio e atrasos atmosféricos; e aleatórios, associados ao ruído do receptor e variações não modeladas do sinal. A precisão refere-se à repetibilidade das medições, isto é, ao grau de dispersão das posições obtidas, enquanto a acurácia indica a proximidade da posição estimada em relação ao valor real (Figura 4). Em sistemas GNSS, quando há presença de erros sistemáticos não corrigidos, é possível obter soluções precisas, porém pouco acuradas.

Na AP a distinção entre precisão e acurácia é fundamental, especialmente em operações como direção automática, VRT e georreferenciamento de amostras de solo. Sistemas que utilizam correção diferencial reduzem significativamente erros sistemáticos e aumentam a acurácia posicional, permitindo acurácia centimétrica exigida para alinhamento de passadas e controle de aplicação dos insumos. Assim, a escolha adequada da classe do receptor e do método de correção é determinante para garantir eficiência operacional e maior qualidade agronômica nas intervenções a campo.

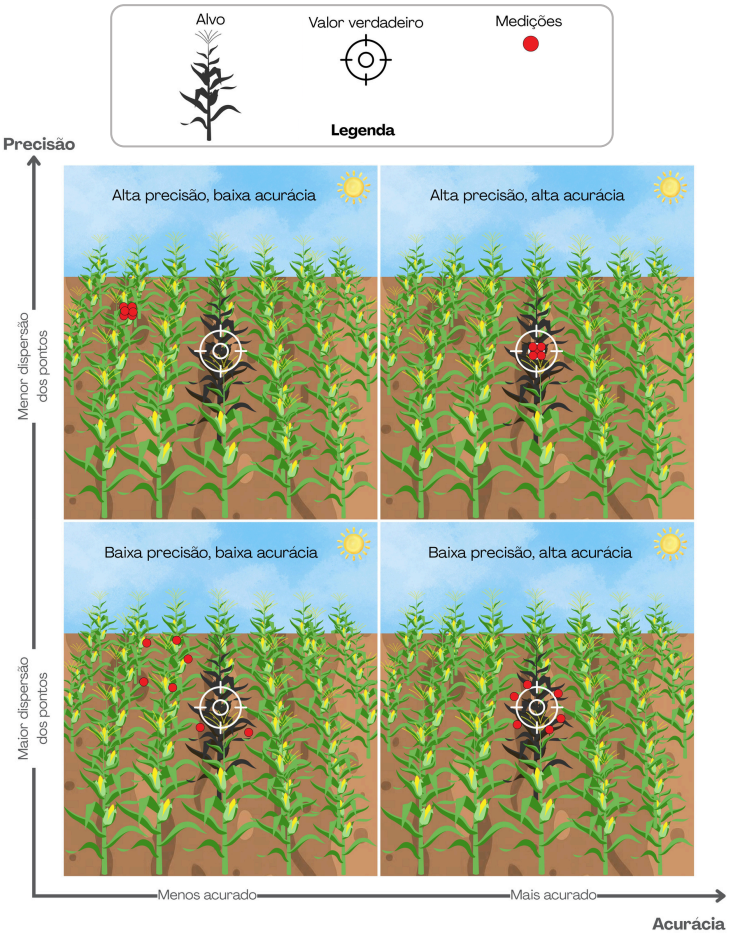


Figura 4. Representação esquemática da diferença entre precisão e acurácia.

Quanto a DOP, citada anteriormente, trata-se de um índice que descreve o efeito da geometria dos satélites sobre a qualidade do posicionamento GNSS. Valores baixos indicam melhor distribuição dos satélites no céu e menor amplificação dos erros de medição. Os principais índices são o HDOP, relacionado ao posicionamento horizontal, o VDOP, associado à altitude, e o PDOP, que representa o efeito combinado nas três dimensões.

Historicamente, o DOP era um parâmetro importante para avaliar a qualidade do posicionamento. Atualmente, sua relevância prática diminuiu devido ao uso simultâneo de múltiplas constelações, como GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, que aumentam o número de satélites disponíveis e melhoram a geometria de observação. Mesmo assim, o DOP continua sendo um indicador útil em situações com obstruções do horizonte, presença de árvores, edificações ou relevo acidentado.

Erros em medições GNSS

Entre os principais erros em medições GNSS estão: **Erro de efemérides (orbital),** que ocorre quando a posição do satélite transmitida na mensagem de navegação não corresponde exatamente à posição real do satélite em órbita. Como o cálculo da posição do receptor depende dessa informação, pequenas imprecisões podem gerar erros de aproximadamente 2 a 5 m. Esse erro é reduzido com correções diferenciais ou com efemérides precisas utilizadas em técnicas como RTK ou PPP.

Erro de relógio do satélite: Os satélites GNSS utilizam relógios atômicos extremamente estáveis, mas pequenas derivações podem ocorrer, pois os receptores GNSS utilizam relógios de quartzo, que são menos precisos. Como a distância ao satélite é calculada a partir do tempo de propagação do sinal, um erro de relógio resulta em erro na estimativa da pseudodistância, um erro de 1 nanosegundo pode resultar em cerca 30 cm de erro na distância. Esses erros são parcialmente corrigidos na mensagem de navegação e podem ser reduzidos com técnicas diferenciais.

Atraso ionosférico (cintilação): Ao atravessar a ionosfera, o sinal GNSS sofre atraso devido à presença de elétrons livres. Esse atraso depende do conteúdo eletrônico total da ionosfera e varia com a atividade solar, hora do dia e latitude. Em regiões equatoriais, como o Brasil, esse erro pode ultrapassar 10 m.

Receptores multifrequência e modelos ionosféricos são usados para reduzir esse efeito. Índices de clima espacial, como Kp e S4, podem ser consultados em tempo real no Space Weather Prediction Center (SWPC). O índice S4, por exemplo, mede a intensidade da cintilação na amplitude do sinal GNSS, indicando irregularidades no plasma ionosférico que podem degradar o posicionamento.

Um exemplo de análise é mostrado na Figura 5, onde é possível acompanhar a variação da atividade ionosférica associada ao ciclo solar, que dura em média 11 anos, e o máximo do ciclo solar 25 (contado a partir do início do monitoramento) ocorreu por volta de 2024–2025, com picos de atividade em 2024.

Atraso troposférico: A troposfera também altera a velocidade de propagação do sinal GNSS. Esse atraso depende de fatores como temperatura, pressão e umidade. O efeito é pequeno quando o satélite está próximo ao zênite, mas aumenta para satélites próximos ao horizonte. Modelos atmosféricos e máscaras de elevação são utilizados para minimizar esse erro.

Erro de relógio do receptor: Os receptores GNSS utilizam relógios de cristal, menos precisos que os relógios atômicos dos satélites. Durante o cálculo da posição, o receptor estima esse erro utilizando observações de pelo menos quatro satélites, permitindo corrigir o desvio do relógio.

Multipercurso: O multipercurso ocorre quando o sinal GNSS chega ao receptor após refletir em superfícies próximas, como edifícios, estruturas metálicas ou o solo . Essas reflexões provocam atrasos adicionais no sinal e podem gerar erros de centímetros a metros. O problema pode ser reduzido com antenas geodésicas e posicionamento adequado da antena.

Ruído eletrônico: está relacionado às limitações internas do hardware do receptor. Embora geralmente pequeno (na ordem de milímetros a centímetros), ele pode afetar medições de alta precisão. Equipamentos de maior qualidade e maior tempo de observação ajudam a reduzir esse efeito.

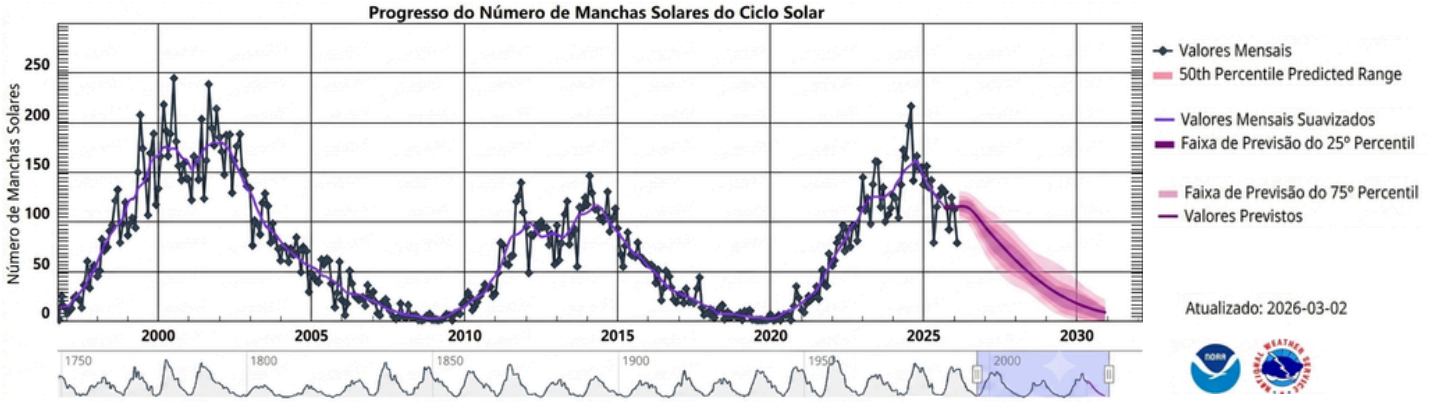


Figura 5. Progressão do número de manchas solares ao longo dos ciclos solares e previsão do ciclo atual e ocorrência de cintilações que podem afetar sinais GNSS.

Correção Diferencial (DGNSS) e AP

A agricultura exige sistemas de posicionamento para o uso de máquinas em movimento, o que demanda correções diferenciais em tempo real. Essas correções podem ser obtidas por meio de comunicação direta entre uma estação de referência e o receptor móvel, ou a partir de redes globais de estações que transmitem as correções via satélite ou internet.

É importante não confundir tempo de observação com tempo de convergência: o primeiro refere-se ao período em que o receptor coleta dados dos satélites, enquanto o segundo é o intervalo necessário para que determinados métodos de posicionamento, como PPP, atinjam sua precisão nominal após o início da solução. Para melhor compreensão dos sistemas de correção GNSS, pode-se considerar três aspectos principais: de onde vem a correção, como ela chega ao receptor e qual precisão ela oferece.

Entre os métodos de correção diferencial estão: **Estação Fixa de referência local (RTK/Base–Rover)**, correção gerada por uma estação de referência: aplicada em pós-processamento ou transmitida em tempo real via rádio (VHF/UHF/AM). A correção vem de uma estação GNSS fixa instalada em uma posição conhecida. Ela chega ao receptor por rádio ou internet. Esse método pode oferecer precisão centimétrica (1–3 cm).

Redes de estações (VRS, Virtual Reference Station), estimativa de uma estação "virtual" próxima ao receptor de usuário móvel (rover) a partir de múltiplas estações reais. Já os sistemas de RTK em rede criam estações virtuais próximas do receptor móvel a partir de redes locais ou regionais de referência.

Sinais diferenciais públicos (SBAS, Satellite-Based Augmentation System), sistemas de aumentação por satélite (ex.: WAAS, Wide Area Augmentation System; EGNOS, European Geostationary Navigation Overlay Service). WAAS (EUA): rede de estações de referência (WRS, Wide-area Reference Stations) envia dados a estações mestres (WMS, Wide-area Master Stations), que geram mensagens de correção e integridade retransmitidas por satélites geoestacionários, melhora precisão a poucos metros e fornece monitoramento de integridade em tempo real.

EGNOS (Europa): SBAS europeu composto por RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations), NLES (Navigation Land Earth Stations), centros de controle e transponders em GEO; fornece correções, integridade e sincronização de tempo úteis para aviação, navegação marítima e agricultura, com precisão típica de 1–2 m em boas condições, transmitindo correções e mensagens de integridade por satélites geoestacionários.

Outra abordagem é o PPP, que utiliza órbitas e relógios de satélites de alta precisão estimados por redes globais de estações GNSS. Diferentemente do RTK, o PPP não depende de uma estação de referência local, pois as correções são geradas de forma centralizada e transmitidas ao usuário via internet ou satélite.

Embora a posição absoluta seja importante em aplicações de mapeamento e georreferenciamento, muitas operações agrícolas dependem principalmente da capacidade de manter trajetórias paralelas e repetíveis. Por esse motivo, o erro transversal, definido como o desvio lateral em relação à trajetória desejada, é frequentemente considerado um dos indicadores mais relevantes para avaliar sistemas de orientação e piloto automático. Pequenos desvios laterais podem resultar em falhas ou sobreposições durante operações de semeadura, pulverização e aplicação de fertilizantes.

Estudos conduzidos em condições cinemáticas mostram que receptores operando com correções RTK tendem a apresentar os menores erros transversais e elevada repetibilidade entre passadas. Serviços baseados em PPP também podem atingir altos níveis de precisão após o período de convergência, embora sua estabilidade possa ser influenciada por interrupções na comunicação e pelo tempo necessário para restabelecimento da solução.

As correções globais em tempo real baseadas em PPP, permitem alcançar precisão decimétrica a centimétrica após um período de convergência. Esses serviços são amplamente utilizados em aplicações agrícolas e de navegação de máquinas por dispensarem infraestrutura local de estações de referência, embora possam apresentar maior tempo de convergência em comparação aos métodos RTK. As correções GNSS podem ser transmitidas ao receptor por diferentes meios de comunicação, incluindo rádio, redes de telefonia celular ou satélites geoestacionários.

Um dos métodos mais utilizados para transmissão via internet é o NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), um protocolo baseado em HTTP que permite transmitir mensagens de correção no formato RTCM, padrão internacional para dados GNSS. Esse sistema de baixo custo possibilita o uso de correções RTK ou VRS utilizando apenas uma conexão de dados móveis, embora sua principal limitação seja a dependência de cobertura de internet, o que representa um desafio em áreas remotas.

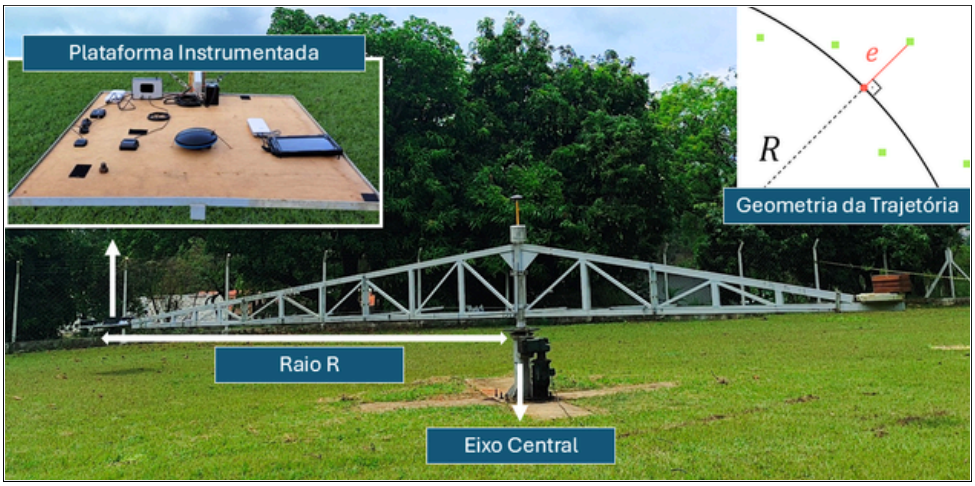


Figura 6. Estrutura tipo pivô no LAP/USP/Esalq, para realização dos ensaios cinemáticos com diagrama esquemático do cálculo do erro de paralelismo (e). Os pontos verdes são as medida obtida pelo receptor, enquanto o ponto vermelho indica a posição na circunferência de referência dos receptores.

Como testar receptores – estático e cinemático

A avaliação do desempenho de receptores GNSS pode ser realizada em condições estáticas ou cinemáticas. Nos ensaios estáticos, o receptor permanece fixo sobre um ponto de coordenadas conhecidas, permitindo quantificar a precisão e a acurácia do posicionamento em condições controladas. Esses testes são importantes para caracterizar o desempenho intrínseco do equipamento, mas nem sempre representam adequadamente as condições encontradas nas operações agrícolas. Na agricultura, máquinas e implementos operam em movimento, tornando os ensaios cinemáticos mais representativos da realidade de campo (Figura 6). Nessa condição, além dos erros inerentes ao sistema GNSS, fatores como velocidade de deslocamento, vibração, obstruções, multipercurso e interrupções na comunicação das correções podem afetar a qualidade do posicionamento.

Laboratório de Agricultura de Precisão (LAP)

Grupo de pesquisa da ESALQ/USP dedicado ao estudo da variabilidade espacial e temporal das lavouras e ao desenvolvimento de métodos e tecnologias para agricultura orientada por dados.

Áreas de atuação

- Mapeamento de produtividade
- Sensoriamento e monitoramento de lavouras
- Análise espacial de dados agrícolas
- Manejo localizado e experimentação em campo
- Desenvolvimento de métodos para a AP

Onde estamos?

Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), Piracicaba– SP, Brasil

Laboratório de Agricultura de Precisão
Departamento de Engenharia de Biossistemas
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Universidade de São Paulo
Av. Pádua Dias, 11 - CEP 13418-900
Piracicaba - SP

Visite nosso site:
www.agriculturadeprecisao.org.br